

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'enseignement Supérieur et de La recherche Scientifique

Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou

Faculté de Génie de La Construction

Département de Génie Civil



Mémoire de master académique

Filière : Génie civil

Spécialité : Géotechnique

Thème

**Etude et analyse numérique de
L'essai pressiométrique.**

Présenté par :

MAMMERI Nassima

Devant le jury composé de :

M^r MELBOUCI Bachir

Professeur à l'UMMTO

Président

M^e BELHASSANI Ourda

Maitre assistante à l'UMMTO

Promotrice

M^r GHOULEM Kamel

Maitre de conférences à l'UMMTO

Examineur

Promotion : 2020/2021

Remerciement

Je remercie en premier Dieu qui m'a donné le courage et la volonté de mener à bien ce travail.

Je remercie aussi ma promotrice *M^m* BELHASANI pour l'encadrement de ce mémoire et pour la confiance qu'elle m'a accordée, ses conseils utiles.

Je tiens à remercier les membres de Jury pour avoir accepté de faire partie du Jury de ce mémoire.

Mes respectueux remerciements vont également aux

Enseignants du département de génie civil de

L'université de Mouloud Mammeri.

J'aimerais aussi remercier ma famille, mes amis et tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à l'élaboration de ce mémoire ainsi qu'à la réussite de ce parcours universitaire.

Dédicace

Je dédie ce travail

A mes très chers parents pour leurs sacrifices, source de vie, d'amour et d'affection

A mes chers frères, source de joie et de bonheur

A toute la promotion géotechnique 2020 /2021.

Et à toute personne ayant contribué, de près ou de loin,

À l'élaboration de ce travail.

Notations Principales

P_l : Pression pressiométrique limite.

P_0 : Pression horizontale des terres au repos.

P_f : Pression de fluage.

V_0 : Volume initial de sol au repos.

V_f : Volume de fluage.

V_s : Volume initiale de la sonde au repos.

V_m : Variation de volume correspondant à la valeur moyenne de la pression appliquée dans la phase pseudo-élastique.

V_T : Le volume indiqué sur le CPV.

V : Volume corrigé.

$\left(\frac{\Delta P}{\Delta v}\right)$: L'inverse de la pente de la partie linéaire de la courbe.

P : La pression exercée sur la paroi de forage.

P_m : La pression lue sur le manomètre.

P_i : est la pression nécessaire pour dilater la sonde de la même.

Z : la profondeur au-dessus de l'appui du pressiomètre.

h : la hauteur hydrostatique

γ_w : Poids volumique de l'eau.

α : Coefficient de compressibilité.

GP_2 : Module de cisaillement sécant à 2% de déformation.

GP5 : Module de cisaillement sécant à 5% de déformation.

β : Coefficient d'identification des sols.

E : Module de Young.

: Coefficient de poisson.

E_P : Module pressiométrique menard.

G : module de cisaillement

φ : L'angle de frottement.

C_u : Cohésion non drainée.

I_T : Indice de rigidité.

ε_r : Déformation radiale.

k_p : Facteur de portance pressiométrique

K : Facteur de compressibilité.

ε_θ : Déformation circonférentielle.

u : Déplacement radial au point de rayon.

q : contrainte verticale appliquée au sol par la fondation.

: Angle de dilatance.

PFP : Pression avec forage préalable.

PAF : Pression auto foreur.

PMF : Pressiomètre foncé.

Liste des figures

Chapitre I

Figure I.1 : Schéma du principe de l'essai pressiométrique Ménard (1955).

Figure I.2 : Contrôleur pression-volume (CPV).

Figure I.3 : Sonde de mesure.

Figure I.4 : Tubulure de connexion.

Figure I.5 : pressiomètre Ménard.

Figure I.6 : Courbe pressiométrique (PFP) avec les différentes phases.

Figure I.7 : Courbe pressiométrique de fluage.

Figure I.8 : Courbe pressiométrique corrigée.

Figure I.9 : Pressiomètre auto foreur – Interprétation de la courbe pressiométrique.

Figure I.10 : Déformation de la pression limite nette équivalente.

Chapitre II

Figure II.1 : Dérivation de la courbe de déformation à partir de la courbe d'expansion (D'après Bague lin et al, 1972).

Figure II.2 : Evolution du volume en fonction de la pression moyenne (D4APR7S carrère).

Chapitre III

Figure III.1 : Roche calcaire turonien

Figure III.2 : Courbe d'étalonnage de l'essai pressiométrique.

Figure III.3 : Courbe pressiométrique à 1.5m de profondeur avec correction (Sondage 1)

Figure III.4 : Courbe pressiométrique à 3m de profondeur avec correction (Sondage 1)

Figure III.5 : Courbe pressiométrique à 4.5m de profondeur avec correction (Sondage 1)

Figure III.6 : Courbe pressiométrique à 1.5m de profondeur avec correction (Sondage 2)

Figure III.7 : Courbe pressiométrique à 3m de profondeur avec correction (Sondage 2)

Figure III.8 : Courbe pressiométrique à 4.5m de profondeur avec correction (Sondage 2)

Figure III.9 : Courbe pressiométrique à 1.5m de profondeur avec correction (Sondage 3)

Figure III.10 : Courbe pressiométrique à 3m de profondeur avec correction (Sondage 3)

Figure III.11 : Courbe pressiométrique à 4.5m de profondeur avec correction (Sondage 3)

Figure III.12 : Profil des pressions limite (Sondage 1)

Figure III.13 : Profil des pressions de fluage (Sondage 1)

Figure III.14 : Profil des modules pressiométrique (Sondage 1)

Figure III.15 : Profil des pressions limite (Sondage 2)

Figure III.16 : Profil des pressions de fluage (Sondage 2)

Figure III.17 : Profil des modules pressiométrique (Sondage 2)

Figure III.18 : Profil des pressions limite (Sondage 3)

Figure III.19 : Profil des pressions de fluage (Sondage 3)

Figure III.20 : Profil des modules pressiométrique (Sondage 3)

Figure III.21 : Courbe de dérivation de la courbe pressiométrique avec la méthode de la sous-tangente.

Figure III.22 : Profils des cohésions non drainées (Sondage 1)

Figure III.23 : Profils des cohésions non drainées (Sondage 2)

Figure III.24 : Profils des cohésions non drainées (Sondage 3)

Chapitre IV

Figure IV.1 : Dimension de la grille à modéliser.

Figure IV.2 : Fenêtre d'introduction des paramètres du sol.

Figure IV.3 : Maillage et conditions aux limites.

Figure IV.4 : Introduction des conditions initiale k_0

Figure IV.5 : Chargement appliqué.

Figure IV.6 : Les courbes de simulation à 1.5m(Sondage1)

Figure IV.7 : Les courbes de simulation à 3m(Sondage 1)

Figure IV.8 : Les courbes de simulation à 4.5m (Sondage 1)

Figure IV.9 : Les courbes de simulation à 1.5m(Sondage2)

Figure IV.10 : Les courbes de simulation à 3m(Sondage2)

Figure IV.11 : Les courbes de simulation à 4.5m (Sondage 1)

Figure IV.12 : Les courbes de simulation à 1.5m (Sondage 3)

Figure IV.13 : Les courbes de simulation à 3m (Sondage 3)

Figure IV.14 : Les courbes de simulation à 4.5m (Sondage 3)

Liste des tableaux

Tableau I.1 : Valeur de γ suivant la nature du sol (Baguelin et al. 1978).

Tableau III.1 : Nature du sol.

Tableau III.2 : Résultats de l'essai pressiométrique et correction à 1.5 m de profondeur.

Tableau III.3 : Les paramètres pressiométriques des différents essais.

Tableau III.4 : Valeur des cohésions non drainée.

Tableau IV.1 : Paramètres du sol pour chaque profondeur.

Tableau IV.2 : Cohésion non drainée déterminé dans le chapitre (3).

Sommaire

Remerciements

Dédicaces

Principale notation

Liste des figures

Liste des tableaux

Sommaire

Introduction générale 1

CHAPITRE I : Présentation de l'essai pressiométrique

Introduction 3

I.1 Historique 3

I.2 Définition de l'essai 3

I.3 Les différents types du pressiomètre 4

I.3.1 Le pressiomètre avec forage préalable (Le pressiomètre Menard) 4

I.3.1.1 Les éléments constituant l'appareil standard 5

I.3.1.2 Principe de l'essai 8

I.3.1.3 Interprétation des résultats de l'essai 8

I.3.1.4 Détermination du module pressiométrique Ménard **E_m** 10

I.3.1.5 Détermination de la pression de fluage **p_f** 10

I.3.1.6 Détermination de la pression limite **P_l** 11

I.3.1.7 Courbe pressiométrique corrigée	11
I.3.2 Le pressiomètre autoforeur	13
I.3.3 Les pressiomètres foncés	15
I.3.4 Le pressiomètre de fluage de longue durée (DIFLUPRESS).....	15
I.4 Exploitation des résultats de l'essai pressiométrique	15
I.5 Calcul des fondations superficielles.....	16
Conclusion.....	17

CHAPITRE II : Méthodes d'interprétation de l'essai pressiométrique

Introduction	18
II.1 Méthodes d'interprétation de l'essai pressiométrique	18
II.1.1 Méthodes empiriques.....	18
II.1.2 Méthodes théoriques.....	19
II.1.2.1 Méthode admettant une déformation sans variation de volume.....	19
II.1.2.2 Méthode admettant une déformation avec variation de volume	22
II.1.3 Méthodes numériques.....	26
Conclusion	27

CHAPITRE III : Correction des courbes pressiométrique et interprétation des résultats

Introduction	28
III.1 Présentation des résultats des essais pressiométriques	28
III.1.1 Les courbes pressiométriques	29
III.1.2 Détermination des paramètres pressiométrique	36

III.2 Détermination de la cohésion non drainée	41
Conclusion.....	45

CHAPITRE IV : Modélisation de l'essai pressiométrique

Introduction	46
IV.1 Présentation du logiciel PLAXIS 2D	46
IV.2 Simulation numérique de l'essai pressiométrique	47
IV.2.1 Conditions aux limites	49
IV.2.2 Conditions initiales	50
IV.2.3 Procédures de simulation numérique	50
IV.3 Résultats et interprétations	51
Conclusion	57

Conclusion générale	59
----------------------------------	-----------

Référence bibliographiques.

Introduction générale

Introduction générale

La réalisation des ouvrages requiert au préalable la caractérisation du sol en place. Cette caractérisation peut s'effectuer soit avec des essais in situ, soit avec des essais de laboratoire, soit avec les deux types d'essais.

Les essais au laboratoire permettent de déterminer une grande quantité de paramètres, mais les résultats dépendent particulièrement de la qualité du prélèvement de l'échantillon, des conditions de conservation et du risque de remaniement du sol rencontrés lors du transport au laboratoire, ce qui a conduit à utiliser les essais in situ afin de déterminer les propriétés mécaniques des sols.

Parmi ces essais, l'essai pressiométrique, qui permet d'appliquer un chargement latéral dans un forage, cet essai a été inventé par Kögler vers les années 1930, mais c'est Louis Ménard à partir 1957 qui a développé de façon définitive le pressiomètre, cet essai est devenu l'un des essais le plus important, puisque il permet de mesurer les caractéristiques mécaniques des sols.

Les résultats obtenus sont limités à deux paramètres (E_M et P_l) qui sont utilisés dans des formulations empiriques. Le module pressiométrique E_M qui définit le comportement pseudo-élastique du sol, la pression limite p_l qui caractérise la résistance de rupture du sol. Ces deux paramètres (E_M et P_l), sont utilisés soit directement pour dimensionner les fondations, soit indirectement (méthode d'interprétations) pour déduire les paramètres intrinsèques des sols (C et φ).

Le travail que nous présentons porte sur l'étude numérique d'un essai pressiométrique. L'étude bibliographique que nous présentons portera d'une part sur les différents types d'essais pressiométriques, d'autre part sur les méthodes permettant d'obtenir des paramètres intrinsèques du sol à partir de l'essai pressiométrique.

Ce mémoire consiste aussi, à évaluer quelques paramètres de comportement, en particulier la cohésion non drainée à partir des quelques méthodes d'interprétation de l'essai pressiométrique empirique et analytique ainsi que numériquement par le logiciel PLAXIS 2D.

Ce mémoire comporte quatre chapitres :

Le premier chapitre est une synthèse bibliographique où on a décrit l'essai pressiométrique, de son histoire, l'appareillage utilisé dans la réalisation.

Le deuxième chapitre présente quelques méthodes d'interprétation de l'essai pressiométrique, en vue de déterminer les paramètres du sol.

Le troisième chapitre est une présentation des courbes expérimentales de l'essai pressiométrique réalisé, ainsi que les différentes corrections faites.

Le quatrième chapitre est une présentation de la modélisation de l'essai pressiométrique avec le logiciel PLAXIS 2D, et l'identification des paramètres de sol.

Enfin, on termine cette étude par une conclusion générale, où on a synthétisé l'ensemble des résultats obtenus.

Chapitre I

Présentation de l'essai pressiométrique

Introduction

L'utilisation des essais de reconnaissance des sols en place s'est particulièrement développée dans le monde. Ce type d'essais permet de s'affranchir des difficultés de prélèvement, de transport et de conservation des échantillons de sol. Parmi ces essais in-situ ; l'essai pressiométrique qui est, couramment utilisé dans les études de fondations.

Dans cette partie de notre étude, nous allons brièvement présenter l'historique et la définition de l'essai pressiométrique et les différents types de pressiomètre existant.

I.1 Historique

L'essai pressiométrique a été inventé par l'Allemand Kögler vers les années 1930, dans le but de mesurer un module de déformation du sol. En raison de la technologie de l'époque, l'appareil n'était pas opérationnel. De plus, l'inventeur n'a pas su interpréter correctement les résultats et l'appareil a été immédiatement abandonné.

C'est en 1954 qu'un jeune ingénieur français, Louis Ménard, a repris l'idée en la perfectionnant : au cylindre gonflable de Kögler, il a ajouté deux cellules de garde à la cellule de mesure centrale, évitant l'expansion de celle-ci vers le forage et rendant ainsi l'essai interprétable. L'appareil est devenu rapidement opérationnel en raison du progrès des cellules constituées de caoutchouc, admettent de grandes déformations et surtout l'invention des tubulures de plastique, semi-rigides rendant possible la réalisation d'essais en profondeur. Mais l'apport de Louis Ménard a surtout consisté à définir les caractéristiques pressiométriques des sols et à mettre au point des règles d'interprétation pour le dimensionnement des fondations en utilisant ces paramètres.

I.2 Définition de l'essai

L'essai pressiométrique est un essai géotechnique in situ, consiste à réaliser une expansion horizontale d'une sonde cylindrique dans un forage exécuté au préalable à une profondeur donnée, sous des contraintes radiales jusqu'à la rupture du sol. L'essai pressiométrique est le seul essai qui permet d'obtenir une relation contrainte-déformation du sol en place.

I.3 Les différents types du pressiomètre

Plusieurs générations de pressiomètre ont vu le jour. Ils se classent en quatre grandes familles, se différenciant par leur méthode de mise en place.

On distingue :

- ❖ Le pressiomètre avec forage préalable (PFP).
- ❖ Le pressiomètre autoforeur (PAF).
- ❖ Le pressiomètre foncé (PMF).
- ❖ Le pressiomètre de fluage de longue durée «DIFLUPRESS

I.3.1 Le pressiomètre avec forage préalable (Le pressiomètre Menard)

Les pressiomètres avec forage préalable sont installés dans une cavité légèrement surdimensionnée. Ces appareils peuvent être mise en œuvre dans tous les types des sols et les roches tendres. L'exemple de ce type d'appareil, est le pressiomètre de Louis Ménard il s'agit d'un essai de chargement statique du terrain en place, effectuée grâce à une sonde dilatable radialement introduite dans un forage réalisé avant. L'ingénieur doit s'assurer de trouver une formation géologique précise pour la réalisation de l'essai. Il doit également éviter les passages hétérogènes dans le terrain, qui peuvent à la fois endommager la sonde ou engendrer un essai qui n'est pas interprétable au sens de la théorie d'expansion de cavité cylindrique. L'essai permet de définir une relation contrainte-déformation du sol en place.

Les résultats de l'essai sont représentés par la courbe $p = f(v)$ figure (I.6).

De cette courbe on détermine trois paramètres :

-) Le module de déformation du sol (module pressiométrique Ménard) E_M
-) La pression de fluage P_F
-) La pression limite P_L

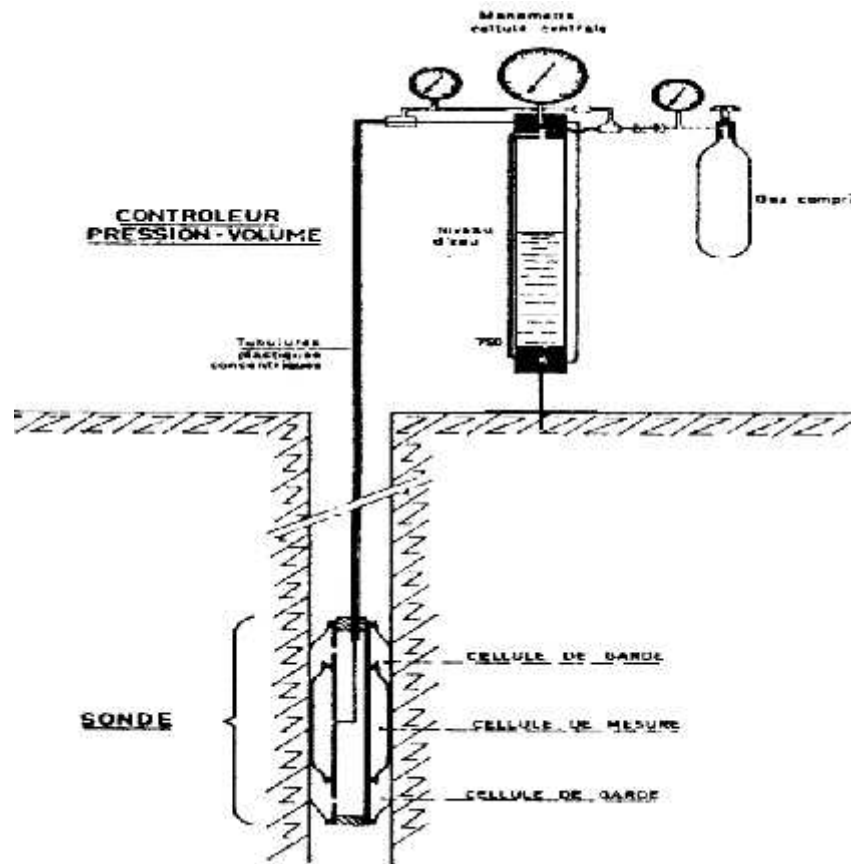


Figure I.1 : Schéma du principe de l'essai pressiométrique Ménard (1955)

I.3.1.1 Les éléments constituant l'appareil standard

Il convient de distinguer dans un pressiomètre trois éléments :

-) Le contrôleur pression volume ou C.P.V.
-) La sonde de mesure
-) Les tubulures de connexion

Le C.P.V (Le Contrôleur pression- volume) est un appareillage de mesure placé en surface du sol, il permet d'exercer les pressions dans la sonde et de mesurer la variation correspondante de volume de celle-ci. Le refoulement de l'eau dans la sonde est obtenu par application de pressions croissantes sur la surface supérieure de l'eau au moyen d'un gaz comprimé.



Figure I.2 : Contrôleur pression- volume (C.P.V)

La sonde de mesure

La sonde pressiométrique est introduite dans une cavité pré-forée, légèrement surdimensionnée, réalisée soit à la tarière à main, soit de manière mécanique suivant la nature de sol. Elle comporte trois cellules :

) Une cellule de mesure centrale

Elle est constituée d'un tube métallique revêtu d'une membrane en caoutchouc gonflée avec de l'eau, exerçant une pression radiale sur les parois du forage.

) Deux cellules de garde

De même conception, disposées aux extrémités de la cellule centrale et gonflées à l'air, tout au moins pour des essais effectués à des profondeurs < 15m. Pour des profondeurs supérieures, il est recommandé de gonfler également à l'eau les cellules de garde, de façon à annuler la différence de pression en cellule due à la

pression hydraulique interne. L'intérêt des cellules de garde et d'assurer une répartition cylindrique uniforme des contraintes et des déformations au niveau de la cellule de mesure ainsi de neutraliser les perturbations d'extrémité.



Figure I.3 : Sonde de mesure

Les tubulures de connexion

Le CPV et la sonde sont reliés par deux tubes plastiques semi-rigides coaxiaux en rilsan. L'une sert au passage de l'eau, l'autre sert au passage du gaz. La tubulure extérieure présentant un diamètre intérieur de 7 mm et un diamètre extérieur de 10 mm est reliée aux cellules de garde de la sonde pressiométrique (gaz) et la tubulure intérieure également en rilsan dont le diamètre intérieur est de 4 mm, et le diamètre extérieur de 6 mm est reliée à la partie centrale de la cellule de mesure (eau).



Figure I.4 : Tubulure de connexion

le chargement se fait par paliers de pression durant 60 secondes. L'essai continue jusqu'à atteindre la pression limite.

I.3.1.2 Principe de l'essai

L'essai pressiométrique est un essai in-situ, il consiste à descendre dans un forage soigneusement calibré, une sonde cylindrique gonflable, on mesure les variations de volume de sol au contact de la sonde en fonction de la pression appliquée.



Figure I.5 : Pressiomètre Ménard

I.3.1.3 Interprétation des résultats de l'essai pressiométrique

Les résultats de l'essai pressiométrique sont usuellement illustrés sous forme d'une courbe où la pression appliquée par le pressiomètre est représentée en fonction de la déformation volumétrique ou radiale de la sonde cylindrique. Cette courbe ayant l'allure montrée sur la figure (I.6) comporte trois phases :

) La phase de recompactage (phase de mise en contact ($0 < P < P_0$; $0 < V < V_0$)

Lorsque la pression augmente dans la sonde, le sol autour du trou, qui s'était décomprimé au forage, se trouve progressivement recomprimé.

À la fin de cette phase, la pression atteint la valeur p_0 de la pression latérale du sol au repos.

) La phase pseudo – élastique (P_0 – P_f ; V_0 – V_f)

Dans cette phase, la déformation radiale varie à peu près linéairement en fonction de la pression appliquée. Cette partie de la courbe permet de déterminer le module de déformation pressiométrique E_M . La pression atteinte à la fin de cette phase est la pression de fluage p_f .

) La phase plastique (p_f – P ; V_f – V).

Un anneau plastifié se forme autour de la cavité lorsque la pression p dépasse la pression de fluage P_f . Pour les très grandes déformations, la pression tend vers une valeur limite. C'est la pression limite, notée P_l par convention cette pression correspond au doublement du volume initial de la sonde ($V_1 = 2V_0$).

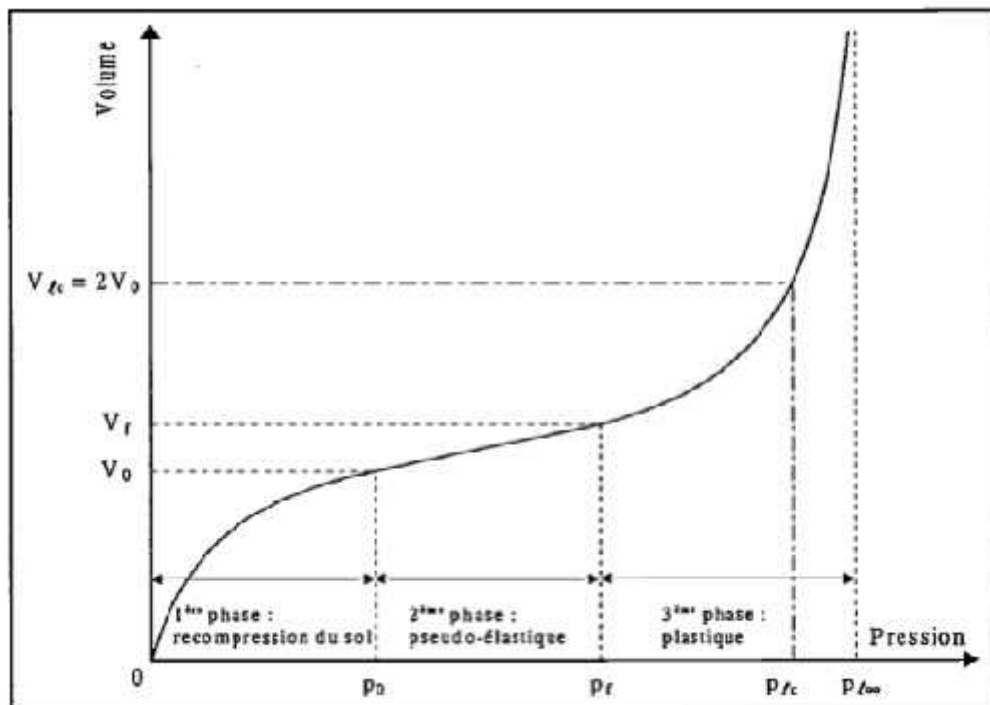


Figure I.6 : courbe pressiométrique (PFP) avec les différentes phases.

I.3.1.4 Détermination du module pressiométrique Ménard E_M

Ce module est égal à l'inverse de la pente de la partie linéaire de la courbe pressiométrique nette. Cette partie linéaire représente en fait une réaction pseudo-élastique du sol sous la sollicitation pressiométrique. Le module E est directement lié à la compressibilité du sol ; c'est pourquoi il est utilisé dans les calculs de tassements de sols, il est calculé selon la relation [I.1] :

$$E_P = 2(1 + \mu) (V_0 + V_m) \left(\frac{P}{V} \right) \quad [I.1]$$

μ : Coefficient de poisson.

V_0 : Volume initiale de la sonde au repos.

V_m : Variation de volume correspondant à la valeur moyenne de la pression appliquée dans la phase pseudo-élastique.

(P / V) : L'inverse de la pente de la partie linéaire de la courbe.

I.3.1.5 Détermination de la pression de fluage P_f

La pression de fluage définit la limite entre le comportement pseudo-élastique et l'état plastique du sol.

$V_{60/30}$: est la variation de volume du liquide injecté dans la cellule centrale de mesure entre le temps $t=30$ s et $t=60$ s après le début du palier de pression P .

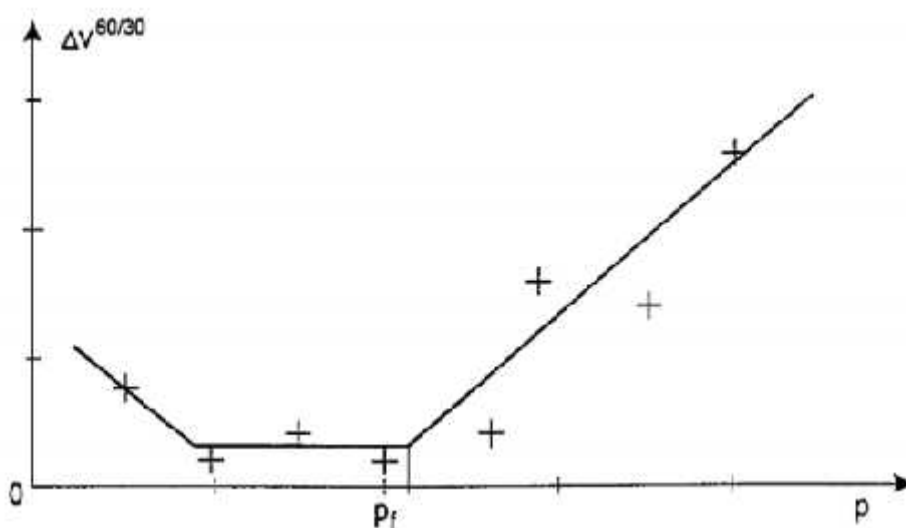


Figure I.7 : Courbe pressiométrique de fluage

I.3.1.6 Détermination de la pression limite P_L

Cette pression correspond à la rupture du sol en place (directement liée à la portance maximale de celui-ci). C'est-à-dire la pression appliquée sur les parois du forage par la sonde dépasse la pression de fluage P_f , le sol entre en plastification. Dans la pratique, cette pression est difficile à atteindre, et par convention, la pression limite est la pression qui entraîne le doublement de la cellule centrale de mesure après la pression P_0 . Elle correspond à un volume injecté.

$$V_L = V_S + 2V_0 \quad [I.2]$$

La pression limite est la pression qui correspond à la plastification de tout le massif. Dans la pratique, cette pression est difficile à atteindre, c'est pourquoi on adopte la pression limite conventionnelle correspondant au doublement du volume de la sonde.

I.3.1.7 Courbe pressiométrique corrigée

Les courbes enregistrées directement à partir des lectures, sont des courbes brutes qui doivent être corrigées pour tenir compte de l'inertie des sondes, variations de volume de l'appareillage et de la hauteur piézométrique.

➤ Correction de l'inertie

La pression P_m majorée de la valeur de la hauteur hydrostatique n'est pas la pression exercée effectivement sur le sol. En effet à toute pression P_m mesurée correspond une déformation de volume lue sur le C.P.V. Pour obtenir la pression qui s'exerce sur la paroi du forage, il faut déduire de la pression P_m mesurée, l'inertie de la sonde P_i (membrane, gaine et éventuellement tube fendu). P_i est la pression nécessaire pour dilater la sonde de la même quantité V_m .

➤ Courbe d'inertie

Pour pouvoir procéder aux corrections d'inertie, il suffit de faire un essai pressiométrique hors du forage, la sonde étant placées verticalement à côté du CPV. La courbe obtenue est appelée courbe d'inertie. La pression p exercée réellement sur la paroi du forage est donnée par la relation suivante :

$$P = P_m - P_i + w(Z + h) \quad [I.3]$$

Avec :

P : La pression exercée sur la paroi de forage.

P_m : La pression lue sur le manomètre.

P_i : La pression nécessaire pour dilater la sonde de la même quantité V_r .

Z : la profondeur au-dessous de l'appui du pressiomètre.

h : la hauteur hydrostatique.

w : Poids volumique de l'eau.

➤ Correction de volumes

Le volume corrigé correspondant à la déformation volumétrique du sol sera, pour chaque pression **P_m** lue sur le manomètre :

$$V = V_r - aP_m \quad [I.4]$$

$$a = \frac{P}{V} \quad [I.5]$$

Avec :

V_r : Le volume lu sur le CPV

V : volume corrigé.

a : Coefficient de compressibilité.

Pour des pressions ne dépassent pas 25 bars .La compressibilité de l'eau , la variation de volume du CPV et des gaines sont négligeables par rapport à la compressibilité du sol.

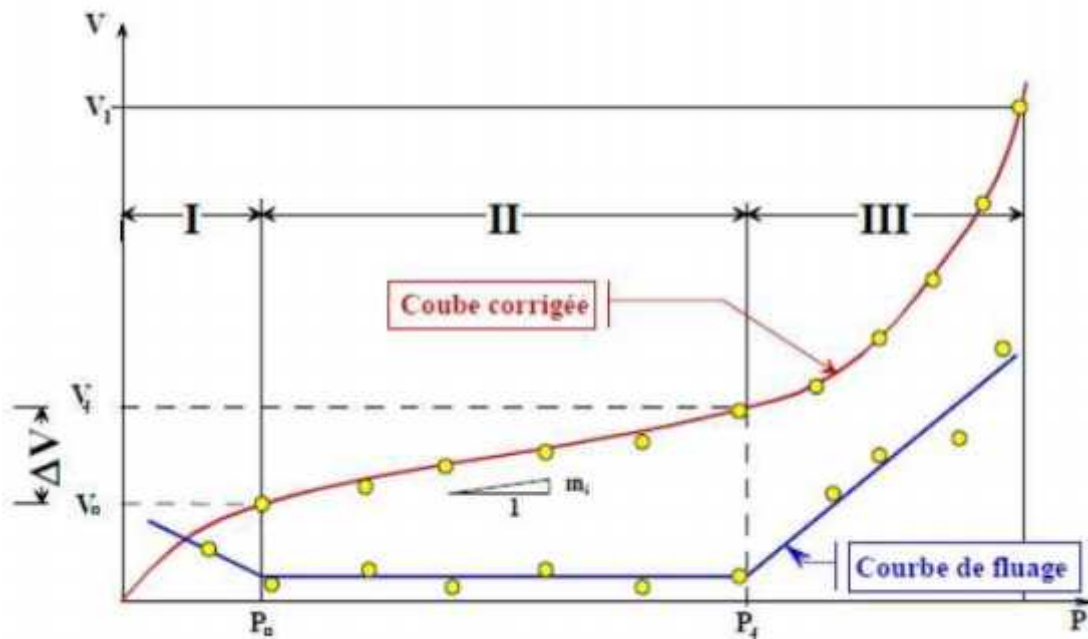


Figure I.8 : Courbe pressiométrique corrigée

I.3.2 Le pressiomètre autoforeur (PAF)

Les premiers pressiomètres autoforeur (PAF), ont été développés indépendamment au laboratoire central des ponts et Chaussées (LCPC) en 1972. Pour diminuer les inconvénients dus au préforage, cette sonde pressiométrique est équipée d'un autoforeur qui peut forer lui-même son propre trou. L'appareil comporte également les 3 parties citées précédemment (pour le pressiomètre de Ménard). Le but de ces appareils est de s'affranchir des problèmes liés au préforage, notamment au déchargement des parois de la cavité qui se poursuit entre la fin du forage et la mise en place de la sonde de mesure.

Les courbes pressiométriques obtenues à partir du PAF ne présentent pas la phase de recompression observée sur les courbes issues du pressiomètre Ménard. La pression de départ est donc la pression totale horizontale des terres au repos (P_0), et la concavité de la courbe est monotone. Le chargement peut se faire à pression ou à déformation contrôlée.

Pour une utilisation pratique de la courbe pressiométrique, Baguelin et al. (1978), ont été amenés à définir plusieurs modules : un module initial tangent

G_{p0} , deux modules de cisaillement sécants G_{p2} et G_{p5} définis entre la pression P_0 et les pressions P_2 et P_5 (P_i est la pression correspondant à la déformation $V/V_0 = i$ %). Le module d'Young est alors donné par l'expression de Lamé :

$$E = 2(1 + \nu) G \quad [I.6]$$

Baguelin et al, ont également défini un coefficient d'identification des sols, noté β , qui caractérise l'allure des courbes $V/V_0 = f(P)$.

Le coefficient d'identification caractérisant le type de sol est défini en fonction des pressions P_0 , P_5 et P_{20} par la relation suivante.

$$\beta = \frac{(P_5 - P_0)}{(P_{20} - P_0)} \quad [I.7]$$

Le comportement du sol au cisaillement affecte la forme de la courbe pressiométrique, le coefficient β dépend donc de la nature du sol. Baguelin et al (1978). Donnent la classification présentée sur le tableau suivant :

Tableau I.1 : Valeur de β suivant la nature du sol (Baguelin et al. 1978).

	Argiles sensibles	argiles	Sables compressibles	Sables Dilatants	Sables très dilatants
B (%)	<25	[25,40]	[35,50]	[25,40]	>60

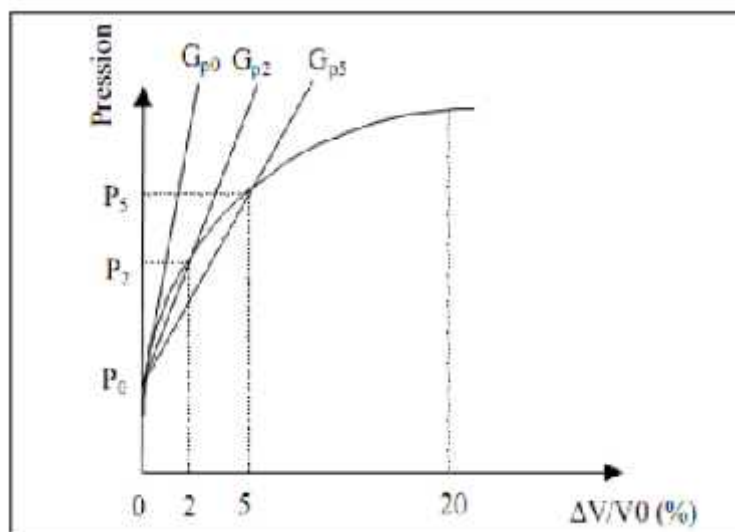


Figure I.9 : Pressiomètre autoforeur - Interprétation de la courbe pressiométrique

I.3.3 Les pressiomètres foncés :

Les pressiomètres foncés sont mis en place par battage, ou vérinage dans le sol. Ils regroupent le pressio-pénétrromètre (LCPC-Ménard, 1978) et le pressiomètre stressprobe(1977) à sonde creuse. Ils étaient originellement conçus pour une utilisation en mer.

I.3.4 Le pressiomètre de fluage de longue durée (DIFLUPRESS)

Le pressiomètre de fluage longue durée a été développé par EDF-GDF dans le but d'étudier les tassements à très long terme des fondations des centrales nucléaires (Leidwanger, 1993). La sonde pressiométrique est similaire à celles des PAF. La différence entre ces deux types de pressiomètre provient du système de chargement qui permet dans le cas du DIFLUPRESS d'effectuer des essais à charge constante de très longue durée. Le piston est chargé par une série de poids permettant d'exercer une pression constante dans le temps, indépendamment de la déformation de la sonde.

I.4 Exploitation des résultats de l'essai pressiométrique

L'essai pressiométrique est un de chargement de la paroi du forage jusqu'à la rupture. Il permet par conséquent d'étudier la phase des petits déplacements du sol en déterminant un module de déformation, et celle des grands déplacements en déduisant la pression limite correspondant à la rupture de sol.

Les paramètres tirés de la courbe pressiométrique sont E_M, P_L, P_f (PFP) et G_0, G_2, G_5, β (PAF), ces paramètres sont utilisés pour interpréter l'essai dans le but de déterminer les paramètres intrinsèques du sol.

I.5 Calcul des fondations superficielles :

➤ Capacité portante unitaire

Cette méthode a été développée à l'origine par L. Ménard. La contrainte de rupture (capacité unitaire) sous charge verticale centrée est donnée par la formule suivante :

$$q = q_0 + K_p (p_l - p_0) = q_0 + k_p P_l^* \quad [I.8]$$

q_l : la contrainte de rupture

q_0 : la contrainte verticale totale

PI : est la valeur de la pression limite mesurée au niveau de la fondation ;

P0 : est la contrainte horizontale initiale du sol au repos mesurée au niveau de la fondation ;

Les valeurs de PI et P0 sont déterminées après exploitation des résultats d'un Essai pressiométrique, elles figurent sur une fiche d'un sondage pressiométrique ;

PI* = PI - P0 est dite pression limite nette

Kp : est un facteur de portance

Pour un terrain non homogène, PI* est remplacé par la pression limite nette équivalente P_{le}^* correspondant à la moyenne géométrique de PI* entre les niveaux D et D+1.5B

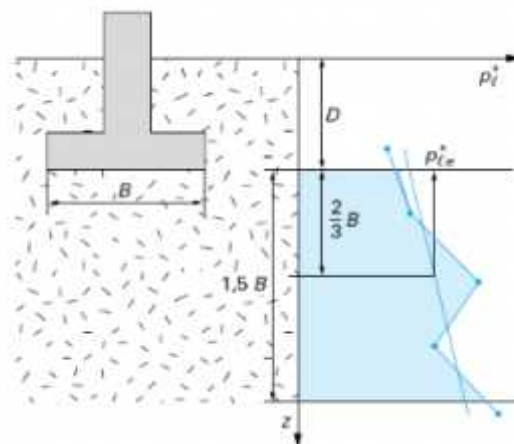


Figure I.10 : Définition de la pression limite nette équivalente

➤ Calcul des tassements par la méthode de Ménard

La technique de calcul du tassement d'une fondation à l'aide des résultats d'un essai au pressiomètre Ménard est basée sur les différents types de sol tel que : le sol homogène ou sol hétérogène.

Conclusion

L'essai pressiométrique est l'un des essais in-situ les plus utilisés dans le monde, il permet de donner une relation contrainte-déformation. C'est un essai rapide ne permettant pas d'aborder les problèmes de consolidation ou de stabilité à long terme, il permet aussi d'éviter certaines difficultés telles que le prélèvement des échantillons, le remaniement, qu'on rencontre avec les essais de laboratoire.

Chapitre II

Méthodes d'interprétation de l'essai pressiométrique

Introduction

L'essai pressiométrique est devenu l'essai le plus important à l'échelle internationale puisqu'il permet d'établir une relation contrainte déformation, les résultats tirés sont utilisés dans le dimensionnement des fondations, ou pour la détermination des paramètres intrinsèques de sol en utilisant des méthodes d'interprétation.

Afin d'identifier ces paramètres, des chercheurs ont mis en œuvre de nombreuses méthodes d'interprétation de l'essai pressiométrique pour exploiter les résultats de cet essai.

On se propose dans ce qui suit de présenter quelques méthodes d'interprétation sans les décrire précisément. En premier les méthodes empiriques qui consistent à déterminer directement les paramètres de dimensionnement et les paramètres du sol. En deuxième lieu les méthodes théoriques, où on distingue les méthodes admettant une déformation sans variation de volume, et celle admettant une variation de volume dans la phase plastique. A la fin on présente quelques méthodes numériques proposés par différents chercheurs.

II.1 Méthodes d'interprétation de l'essai pressiométrique

Les différentes méthodes d'interprétation peuvent être séparées en trois catégories : les méthodes empiriques, les méthodes basées sur une étude analytique, et enfin les méthodes numériques.

II.1.1 Les Méthodes empiriques

On cite les travaux de Ménard qui ont eu une influence importante sur toutes les théories qui ont suivi. Ménard a proposé une relation empirique reliant la cohésion non drainée C_U à P_l dans le cas d'une argile cohérente, et on peut citer aussi les travaux de Amar et Jezequel (1973).

Ces méthodes permettent notamment d'évaluer la valeur de la cohésion non drainée C_{ud} à partir de la pression limite P_l .

La relation proposée par Ménard est :

$$C_U = \frac{P - P_0}{5.5} \quad \text{[II.1]}$$

La relation proposée par Amar et Jezequel est :

$$C_U = (P_L - P_0) / 10 + 25 \text{ (Kpa)} \quad [\text{II.2}]$$

Pour $(P_L - P_0) > 350 \text{ Kpa}$

Avec :

P_L : Pression limite pressiométrique.

P_0 : Pression horizontale des terres au repos.

C_U : Cohésion non drainée.

Pour d'autres problèmes comme le soutènement, Ménard proposa des estimations de l'angle de frottement toujours avec la pression limite.

II.1.2 Méthodes théoriques (analytique)

Les méthodes analytiques sont principalement basées sur la théorie élasto-plastique de l'expansion d'une cavité cylindrique en milieu infini, en admettant le critère de Mohr Coulomb.

On distingue deux types de méthodes ; méthodes avec hypothèse de déformation sans variation de volume dans la phase plastique, Ménard, [Gibson et Anderson, 1961; Baguelin et Al 1972) et méthodes avec hypothèse de déformation avec variation de volume [Salençon, 1966] , [Hughes et al, 1977].

II.1.2.1 Méthode d'interprétation admettant une déformation sans variation de volume dans la phase plastique

➤ Méthode de Ménard

En supposant que le sol admet le critère de plasticité de Mohr-Colomb en admettant l'hypothèse de déformation à volume constant, Ménard a établie en 1957 une relation qui décrit le comportement du sol

$$P_L = 1 + \sin\varphi + C \frac{E}{Z(1 + \sin\varphi)P_0 s_i + C} \frac{s_i}{1 + s_i} - C \quad [\text{II.3}]$$

Avec:

φ : Angle de frottement interne

C : cohésion

Pour une argile non drainée cette relation devient :

$$P_L = P_0 + C_u \left(1 + \log \frac{E}{2(1+\nu)C_u} \right) \quad [\text{II.4}]$$

➤ Méthode de Gibson et Anderson

Gibson et Anderson proposent une formulation en proposant que le comportement du sol est élastique jusqu'à la rupture dont le critère rupture est celui de Tresca.

L'analyse proposée aboutit à une relation exprimant la pression limite P_L en fonction de la cohésion non drainé C_u

$$P_L = P_0 + C_u (1 + I_r I_r) \quad [\text{II.5}]$$

Avec :

$$I_r = \frac{G}{C_u} [\text{II.6}]$$

Et

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} [\text{II.7}]$$

I_r : Indice de rigidité,

G : module de cisaillement

E et ν : respectivement le module de Young et le coefficient de poisson déterminé au début de la courbe pressiométrique,

P_0 : Pression des terres au repos.

Pour un matériau incompressible la formulation proposée coïncide avec celle proposée par Ménard et Salençon

$$C_u = \frac{P_L - P_0}{1 + \frac{E}{2(1+\nu)C_u}} \quad [\text{II.8}]$$

➤ Méthode de Baguelin et al 1972

Baguelin et al ont élaboré une méthode d'interprétation qui présente une plus grande généralité, car elle ne fait appel qu'aux trois hypothèses simples suivantes :

- a. L'essai est non drainé ;
- b. Les déformations se font à volume constant ;
- c. L'influence de la pression moyenne est négligée.

On présente ici la théorie de Baguelin ; sous l'effet d'un chargement radial, un point situé dans le massif à une distance r du centre du forage se déplacera de u et se trouvera donc à une distance du centre égale à :

$$\rho = r + u \quad \text{[II.6]}$$

$$\varepsilon_r = \frac{d}{d} \quad \text{[II.7]}$$

$$\varepsilon_\theta = \frac{u}{r} \quad \text{[II.8]}$$

Avec :

ε_r : Déformation radiale.

ε_θ : Déformation circonférentielle.

u : Déplacement radial au point de rayon r .

Pour simplifier les calculs, les auteurs de la méthode ont montré que tant que les déformations ne sont pas trop importantes, on peut représenter la courbe pressiométrique par l'équation :

$$P = P_0 + \frac{1}{2b} [\alpha(1 + \text{Log } \varepsilon_0^2) + 2 \text{Arctg } \varepsilon_0] \quad \text{[II.9]}$$

α Sont des constantes qui sont déterminées par ajustement de la courbe théorique sur la courbe expérimentale.

ε_0 Est connue en fonction du déplacement de la paroi u_{r_0} et du rayon r_0

Après dérivation de l'équation [II.9] on obtient :

$$\tau = \frac{1}{b} \frac{a\varepsilon_0^2 + \varepsilon_0}{\varepsilon_0^2 + 1} (1 + \varepsilon_0) \left(1 + \frac{\varepsilon_0}{2}\right) \quad \text{[II.10]}$$

Ou en petites déformations :

$$\tau = \frac{1}{b} \frac{a\varepsilon_0^2 + \varepsilon_0}{\varepsilon_0^2 + 1} \quad \text{[II.11]}$$

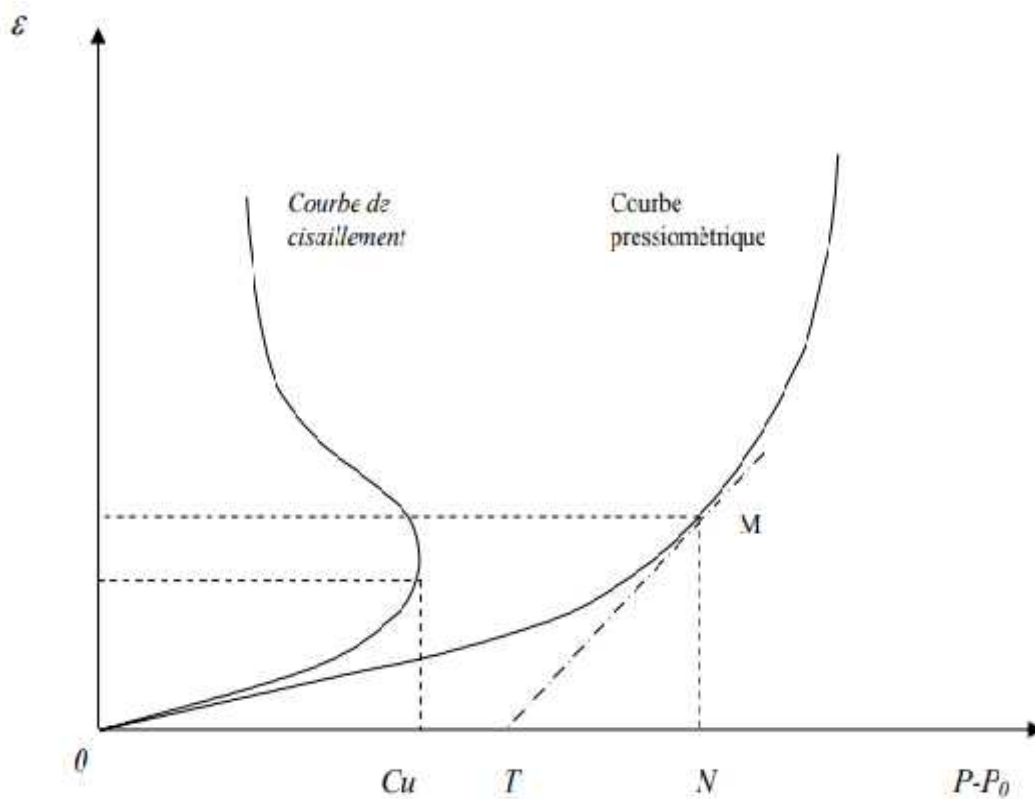


Figure II.1 : Dérivation de la courbe de déformation à partir de la courbe d'expansion (D'après Baguelin et al, 1972)

II.1.2.2 Interprétation de l'essai pressiométrique avec l'hypothèse de déformation avec variation de volume

L'hypothèse de déformation à volume constant convient pour les argiles plastiques saturées et dans le cas où l'essai est si rapide pour qu'il n'y ait pas de drainage, mais cette hypothèse ne convient pas pour les sols perméables, les sables dilatants. Pour cela, divers chercheurs ont pensé à ce problème et proposé des méthodes d'interprétation en considérant des déformations avec variation de volume. On présente dans ce qui suit, l'étude de Carrère [Cassan, 1978].

➤ Méthode de Carrère

Carrère a déterminé l'équation de la courbe pressiométrique en phase plastique dans le cas d'un sol pulvérulent ($C=0$) (Figure II.1)

Sa théorie est basée sur la constatation expérimentale que la densité d'un sol pulvérulent est fonction de la contrainte moyenne.

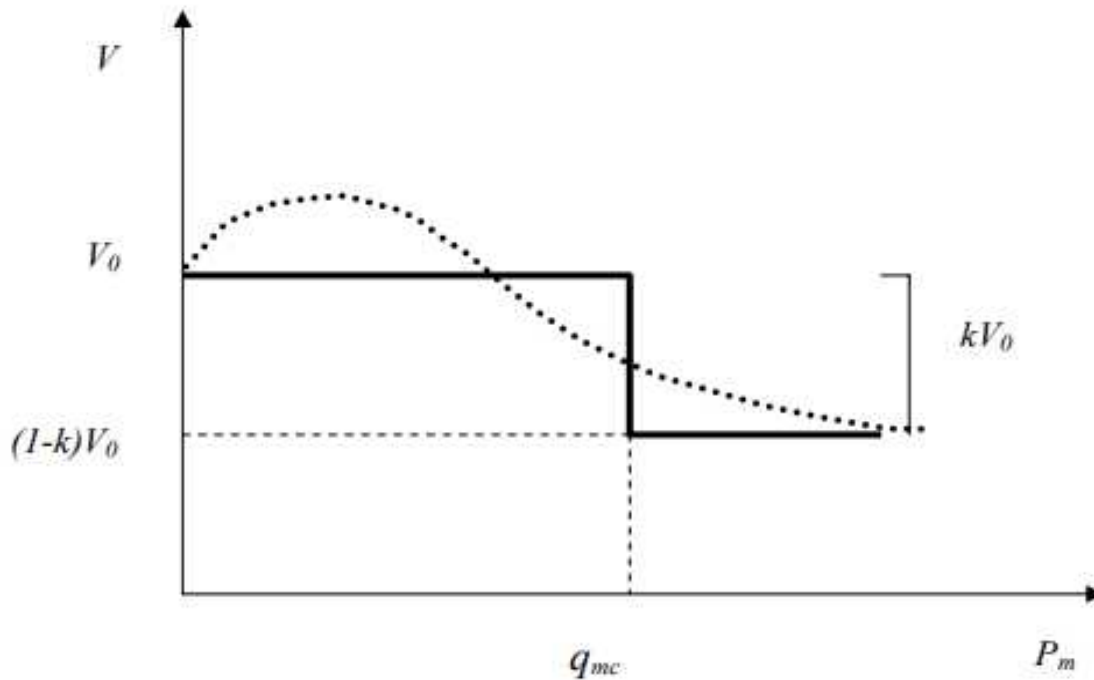


Figure II.1 : Evolution du volume en fonction de la pression moyenne (D4APR7S carrère).

Donc un élément donné évoluera en fonction de la contrainte. Il est évident que l'utilisation d'une telle théorie est compliquée. C'est pourquoi Carrère a substitué à la courbe réelle continue, la courbe discontinue (en trait plein), ce qui conduit à définir deux paramètres qui caractérisent le comportement plastique du sol ;

Une contrainte moyenne critique q_m qui sépare la zone où les déformations se font à volume constant de la zone où les déformations se font avec variation de volume.

Un coefficient de compressibilité

$$K = \frac{v}{v_c} \quad \text{[II.4]}$$

Dans le cas d'un sable purement frottant ($C=0$) Carrère a donné l'expression suivante pour la courbe pressiométrique,

$$P_l = (1 + \sin \varphi) p_0 \left[\frac{(1-k) p_c s}{\mu} + k \left(\frac{q_m}{p_c} \right)^{-\frac{1}{a}} \right] \quad [\text{II.5}]$$

$$\mu = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad [\text{II.6}]$$

$$a = \frac{s}{(1+s)} \quad [\text{II.7}]$$

Terrain incompressible ($k=0$),

Carrère propose la relation suivante:

$$P_l = P_0 + C_u \quad [\text{II.8}]$$

Terrain compressible ($k=1$), l'expression de PL devient :

$$P = P_m - C_u \quad [\text{II.9}]$$

Méthode de Hughes et al (1977)

C'est la méthode la plus utilisée dans les pays anglophones pour interpréter les résultats de l'essai pressiométrique autoforeur. Cette méthode permet la détermination de l'angle de dilatance et l'angle de frottement à la rupture. Cette méthode est basée sur un nombre d'hypothèses qui sont ;

Le pressiomètre est considéré comme étant de longueur infinie,

Le comportement du sable est initialement élastique jusqu'à atteindre une valeur limite du rapport des contraintes et la rupture se produit avec cette valeur de rapport de contraintes, le comportement du sable devient parfaitement plastique et la déformation élastique est très petite, donc négligée.

Le rapport des contraintes est exprimé par le critère de Mohr Coulomb par :

$$\frac{\sigma}{\sigma} = N = \frac{1-s}{1+s \eta}$$

L'angle de dilatance est définie par

$$\sin \Psi = -\frac{d}{a}$$

V : déformation volumique

γ d

: angle de dilatance

Ces auteurs schématisent les courbes obtenues par Stroud (1971) à l'appareil de cisaillement pur et ne s'intéressant qu'à la zone plastique entourant la sonde, ils établissent l'équation suivante reliant la pression dans la cavité P et la déformation ϵ de la cavité :

$$\ln (P-U_0) = S \ln \left(\epsilon + \frac{\epsilon_c}{2} \right) + \text{constante} \quad [\text{II.10}]$$

U_0 : pression interstitielle.

c : constante

Cette relation est une droite de pente S dans les axes logarithmiques, S est donnée par

$$S = \frac{(1+S_c) S_c}{1+S_c} \quad [\text{II.11}]$$

La deuxième relation reliant $\sin \Psi$ et $\sin \alpha$ est obtenue à partir de l'équation contrainte dilatance de Rowe (1962).

$$\frac{\sigma_1}{\sigma_3} = t_1^2 \left[\frac{\pi}{4} + \frac{c}{2} \right] \left[1 - \frac{d}{a \epsilon_1} \right] \quad [\text{II.12}]$$

c Est l'angle de frottement interne en grande déformation (déformation à volume constant), cette quantité ne dépend ni de la densité initiale, ni de remaniement de l'échantillon et peut donc être déterminée à partir d'essais de laboratoire ou estimée à partir des recommandations de Robertson et Hughes (1986)

Graves et silts bien gradués	40°
Sable grossier uniforme	37°
Sable moyen bien gradué	37°
Sable moyen uniforme	34°
Sable fin bien gradué	34°
Sable fin uniforme	30°

Tableau II.1 : estimation de l'angle de frottement ϕ_{cv} (d'après Robertson et Hughes, 1986).

L'équation (II.13) peut s'écrire sous la forme suivante :

$$\frac{1+s}{1-s} = \left[\frac{1+s}{1-s} \frac{c}{c} \right] \left[\frac{1+s}{1-s} \right] \quad \text{[II.13]}$$

Les Valeurs de ψ et s déduits des deux équations (II.11) et (II.13).

Cette méthode donne des angles de frottement acceptables pour les sables dilatants, mais trop élevées pour les sables remaniés (Fahey,1980, (Jewell et al, 1984).

II.1.3 Les méthodes numériques

Le développement des moyens informatiques a conduit à la mise au point de codes de calcul de plus en plus élaborés. Depuis quelques années, de nombreux travaux portent sur l'identification des paramètres de modèles de comportement à partir de l'essai pressiométrique. On peut citer notamment les travaux de boubanga (1990) et Bahar(1992) menés à l'Ecole Centrale de Lyon. Un logiciel d'identification de paramètres de modèles de comportement à partir de l'essai pressiométrique a été développé et a été appliqué à différents modèles (Cambou et Bahar, 1993).

De la même manière, Michali et Hicher (1994) utilisent les résultats d'essais pressiométriques et de laboratoire pour déterminer les paramètres d'une loi élastoplastique(Hujeux).

Zantar (1999) a utilisé un logiciel d'optimisation couplé à un logiciel d'éléments finis pour identifier certains paramètres d'un modèle élastoplastique(Cam-Clay modifié) à partir des résultats d'essais pressiométriques.

Conclusion

L'essai pressiométrique est un essai de chargement de la paroi du forage jusqu'à la rupture. Il permet de donner une relation contrainte déformation qui représente le comportement du sol, et permet aussi d'éviter certaines difficultés telles que le prélèvement des échantillons, le remaniement, qu'on rencontre avec les essais de laboratoire.

Les paramètres obtenus à partir de cet essai sont utilisés soit directement, dans le calcul des ouvrages (calcul de la capacité portante des fondations à partir de la pression limite), soit indirectement, en déterminant les caractéristiques intrinsèques du sol (particulièrement les paramètres de cisaillement) en utilisant des règles empiriques, des méthodes théoriques ou des méthodes numériques. On a vu que ces méthodes considèrent toujours des hypothèses simplificatrices.

Dans le chapitre suivant, on présentera le problème ainsi que l'outil numérique utilisé pour simuler l'essai pressiométrique.

Chapitre III

Interprétation des courbes pressiométriques

Introduction

Suite à la réalisation de l'essai pressiométrique dans le sol, les paramètres de comportement de sol seront enregistrés. Les courbes établies directement à partir des lectures, sont des courbes brutes qui ne peuvent être interprétées sans diverses corrections.

En effet, les lectures des pressions et volumes faites sur le terrain doivent subir des corrections tenant en compte ;

- De la surcharge piézométrique due à la hauteur de la colonne d'eau dans l'appareil.
- De l'élasticité propre de l'ensemble membrane + gaines, appelée «inertie».
- De la compressibilité interne de l'appareil.

III.1 Présentation des résultats des essais pressiométriques

À partir des résultats des essais pressiométriques réalisés sur un terrain dans la wilaya de Ghardaïa. Ces résultats ont été fournis par le laboratoire de mécanique des sols de la wilaya de TIZI OUZOU «BOGHNI».

Les premières observations des essais, montrent le profil suivant (tableau III.1)

Tableau III.1 : Nature du sol.

Profondeur (m)	Nature Lithologique
0- 0.25	Sable
0.25–1.5	Roche calcaire turonien
1.5- 3	Roche calcaire turonien
3 - 4.5	Roche calcaire turonien



Figure III.1 : Roche calcaire turonien

Menard a attiré depuis longtemps l'attention sur le fait que les valeurs du rapport $(E_m / (PI))$ sont en liaison avec l'histoire du sol en particulier avec sa raideur. Ce rapport représente donc un paramètre important sur lequel Menard s'est basé pour proposer une classification des sols. Dans les argiles ou les roches, et d'après les résultats trouvés à laboratoire de mécanique des sols de boghni, on peut conclure que le sol c'est un roche calcaire turonien.

III.1.1 Les courbes pressiométriques

La courbe pressiométrique brute est la courbe pression en fonction de volume tracé directement à partir des résultats pressiométriques brutes, ce sont les résultats lus sur le manomètre et le CPV sans correction.

Les résultats des essais pressiométriques obtenues sont bruts et nécessite des corrections.

Ces corrections concernant la hauteur piézométriques et l'inertie (donnée dans le chapitre I par la relation [I.3]).

Pour pouvoir procéder aux corrections de l'inertie il suffit de faire un essai pressiométrique hors du forage, la sonde étant placée verticalement à coté du CPV, la courbe obtenue est appelée courbe d'étalonnage représentée sur la figure ci-dessous :

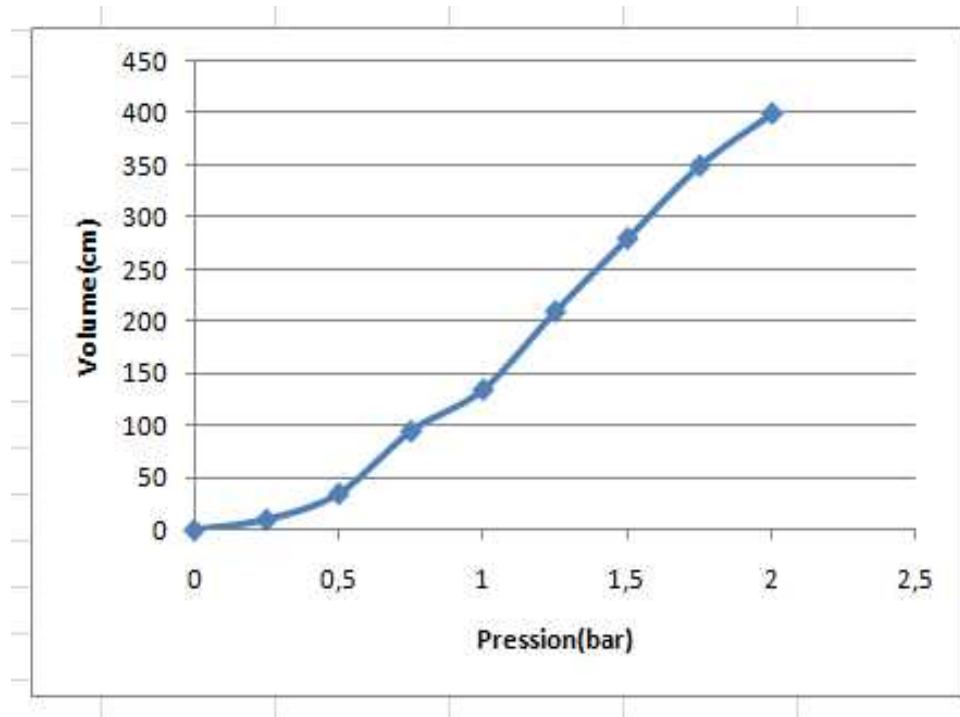


Figure III.2 : Courbe d'étalonnage de l'essai pressiométrique

Les corrections effectuées permettent de tracer la courbe pressiométrique corrigée, Ces corrections sont effectuées sur les résultats pressiométriques brutes qui nous ont été donnés sur les différentes profondeurs.

Un exemple est montré sur le tableau(III.1) ainsi que toutes les courbes correspondant aux différentes profondeurs

➤ Sondage pressiométrique 1

Tableau III.2 : Résultats de l'essai pressiométrique et correction à 1.5 m de profondeur

Pression brute (bars)	Volume à 30s (cm³)	Volume à 60s (cm³)	Volume defluage	Pression corrigée (bars)
0	0	0	0	0,17
0,25	27	32	5	0,28
0,5	52	57	5	0,42
0,75	72	82	10	0,56
1	97	107	10	0,70
1,25	102	187	85	0,60
1,5	232	262	30	0,52
1,75	291	298	7	0,62
2	307	309	2	0,82
2,25	312	318	6	1,03
2,5	323	323	0	1,26
2,75	326	327	1	1,49
3	332	337	5	1,70
3,5	338	339	1	2,19
4	342	347	5	2,65
5	348	352	4	3,63
6	362	367	5	4,56
7	372	378	6	5,52
8	387	387	0	6,48
9	392	397	5	7,43
10	407	422	15	8,32

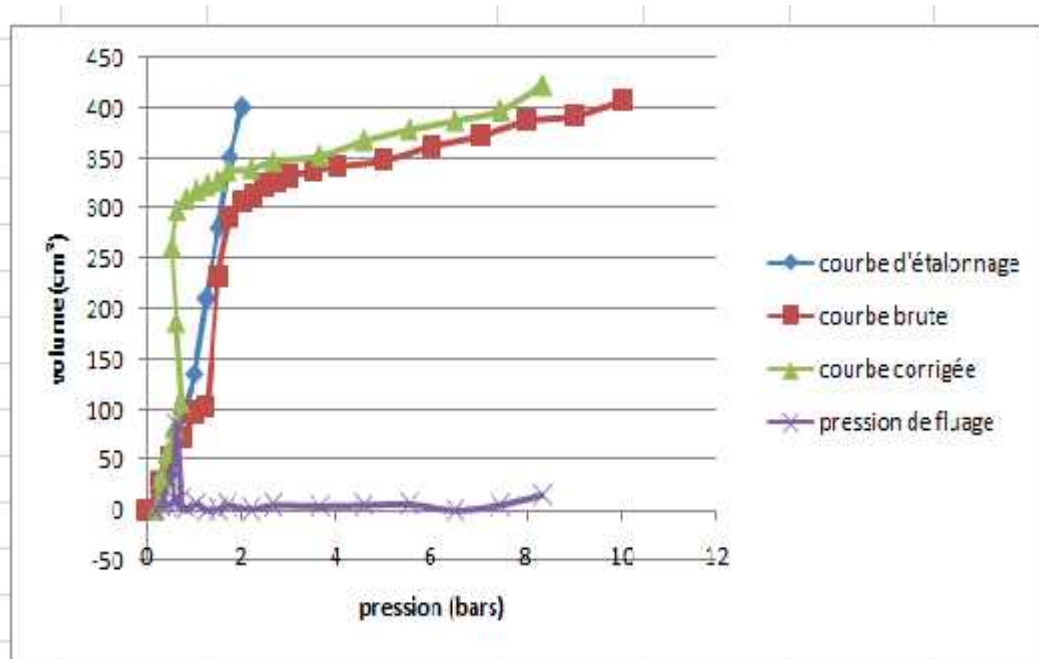


Figure III.3 : Courbe pressiométrique à 1.5m de profondeur avec correction.

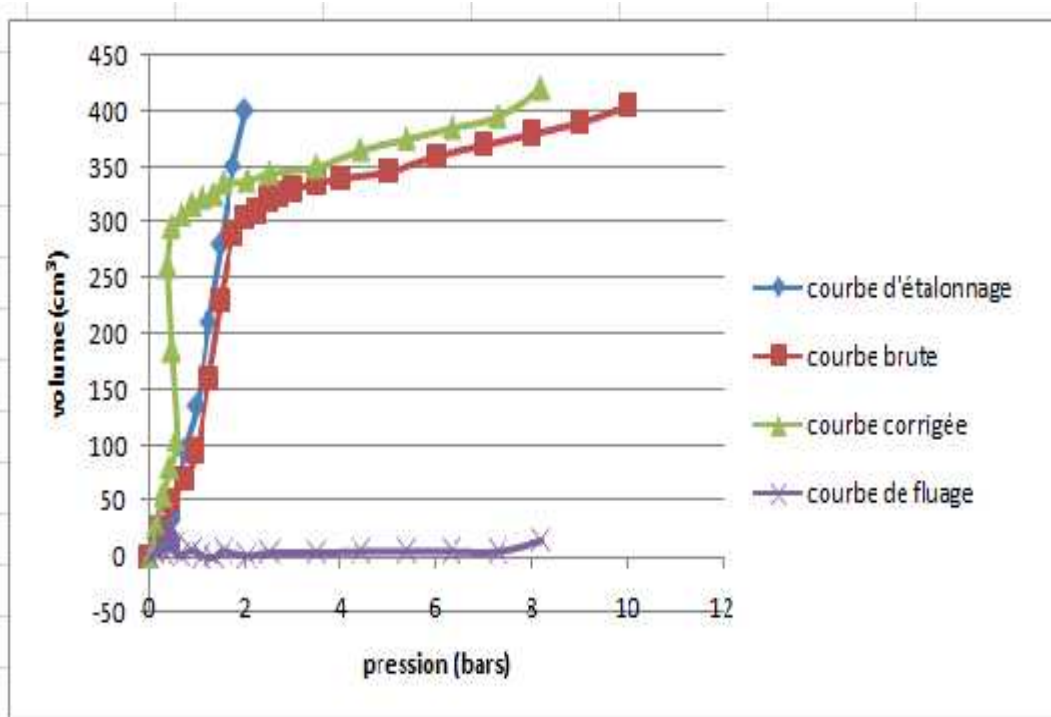


Figure III.4 : Courbe pressiométrique à 3m de profondeur avec correction.

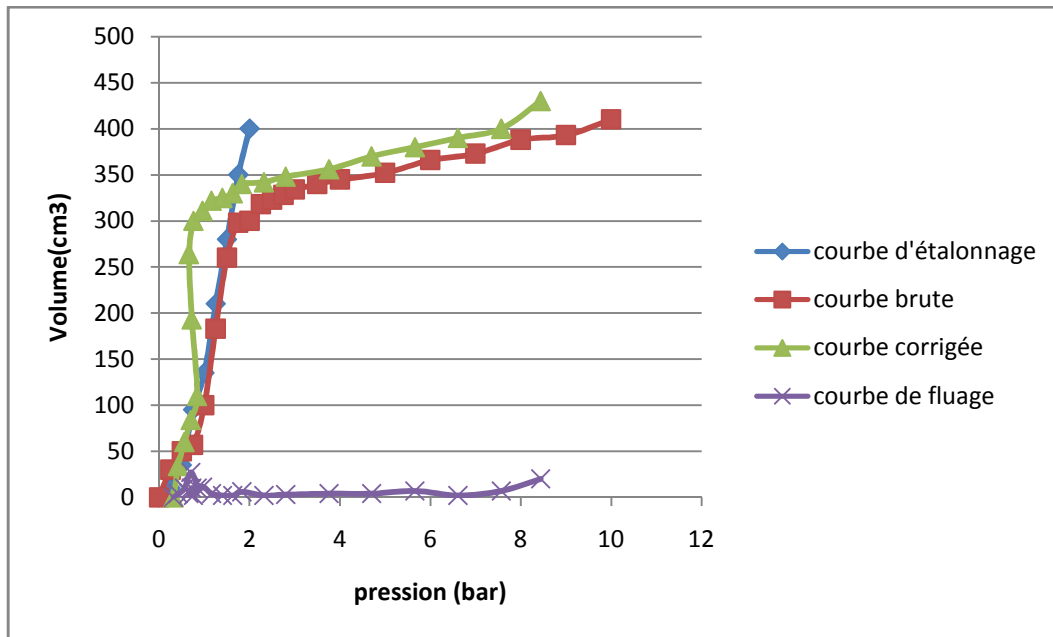


Figure III.5 : Courbe pressiométrique à 4.5m de profondeur avec correction.

➤ **Sondage pressiométrique 2**

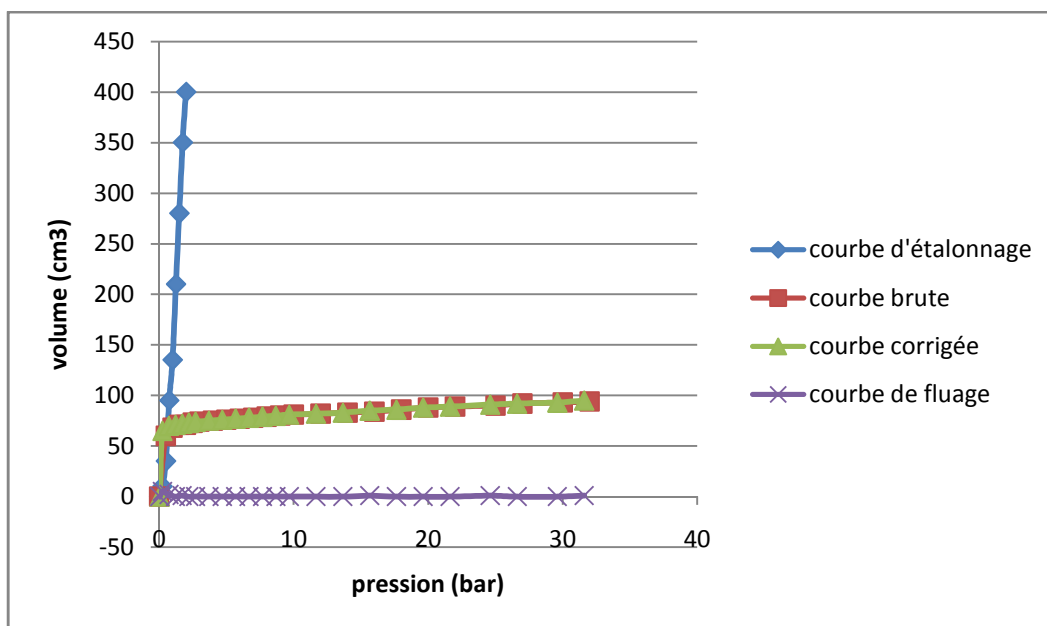


Figure III.6 : Courbe pressiométrique à 1.5m de profondeur avec correction (sondage 2).

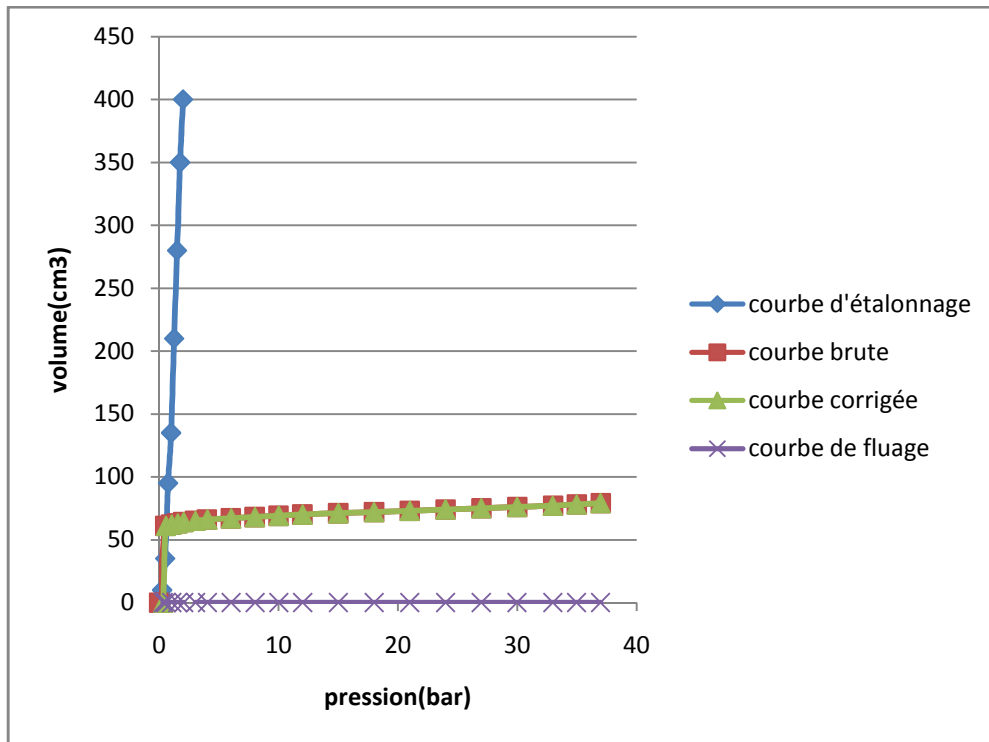


Figure III.7 : Courbe pressiométrique à 3m de profondeur avec correction.

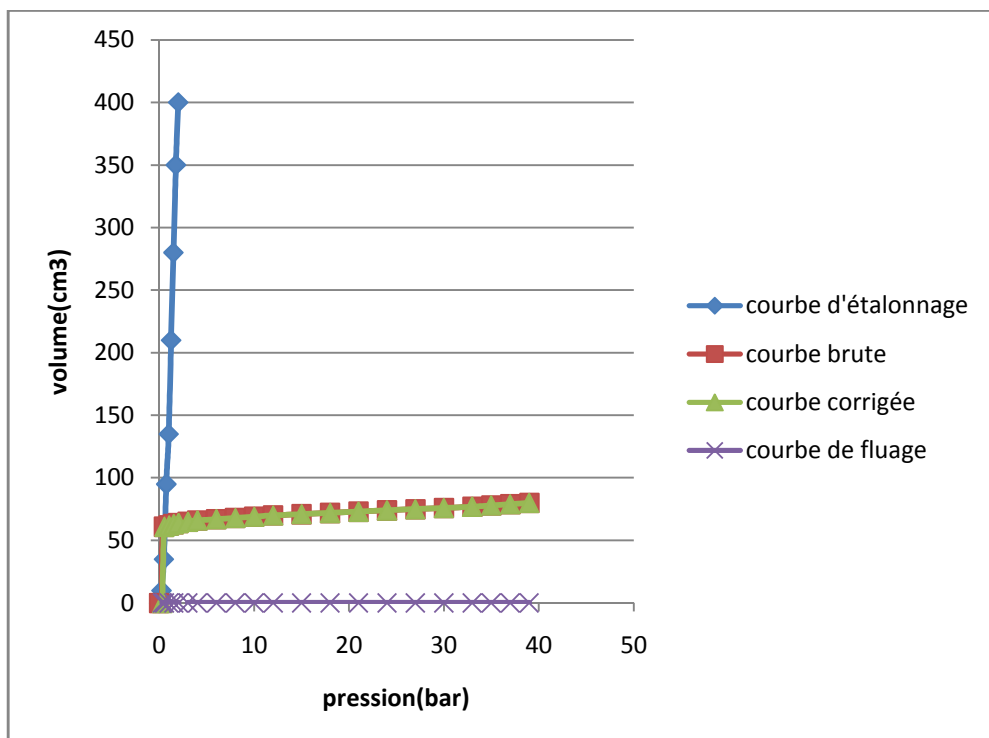


Figure III.8 : Courbe pressiométrique à 4.5m de profondeur avec correction.

➤ Sondage pressiométrique 3

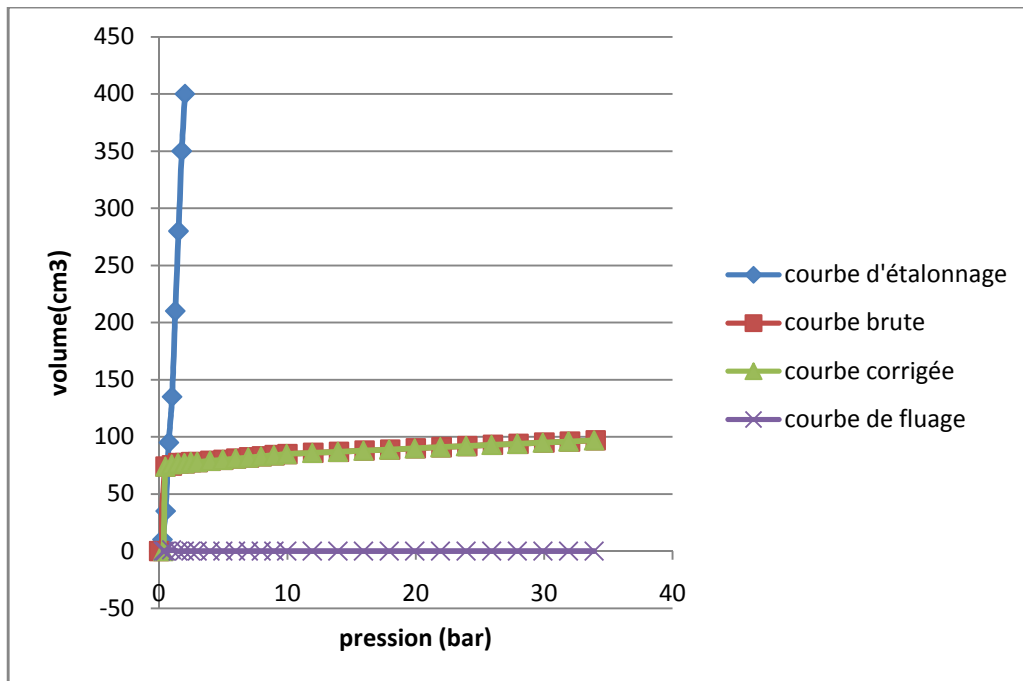


Figure III.9 : Courbe pressiométrique à 1.5m de profondeur avec correction.

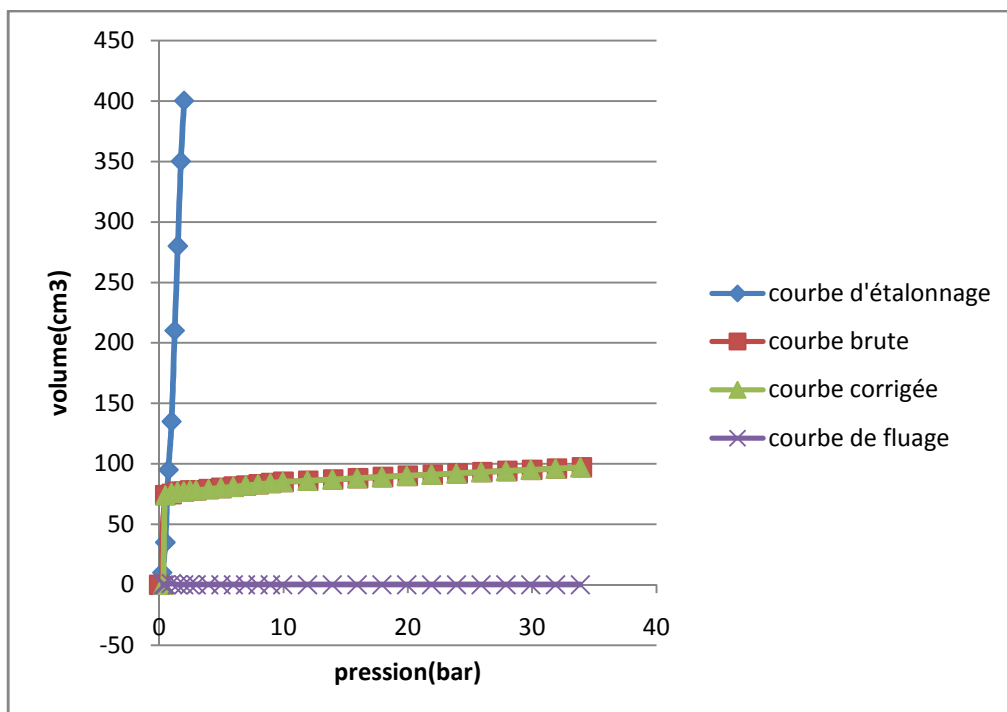


Figure III.10 : Courbe pressiométrique à 3m de profondeur avec correction.

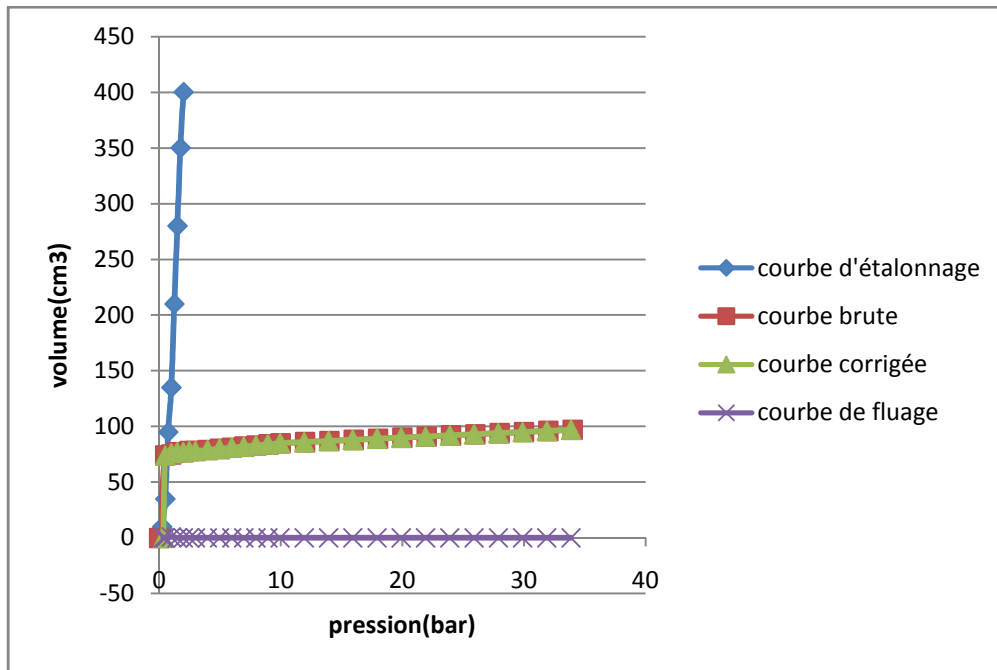


Figure III.11 : Courbe pressiométrique à 4.5m de profondeur avec correction.

III.1.2 Détermination des paramètres pressiométriques

Après avoir effectué les corrections nécessaires des courbes pressiométriques, on passe à la deuxième phase qui est la détermination des modules pressiométriques E_P , les pressions limites P_L et pressions de fluage P_f .

Le module pressiométrique E_P est déterminé par la formule suivante :

$$E_P = 2(1 + \nu) (V_0 + V_m) \left(\frac{\Delta P}{\Delta V} \right) \quad [\text{III.1}]$$

Avec :

ν : Coefficient de poisson ($\nu = 0.33$)

V_0 : Volume initiale de la sonde au repos ($V_0 = 32 \text{ cm}^3$)

V_m : Variation de volume correspondant à la valeur moyenne de la pression appliquée dans la phase pseudo-élastique ($V_m = V_0 + \frac{V_1 + V_2}{2}$)

$\left(\frac{\Delta P}{\Delta V} \right)$: L'inverse de la pente de la partie linéaire de la courbe

Les résultats sont récapitulés dans le tableau (III.3), ou sur les profils donnés par les figures (III.12), (III.13), (III.14)

Tableau III.3 : Les paramètres pressiométriques des différents essais.

➤ **Sondage pressiométrique 1**

Profondeur (m)	E_P (bars)	P_L (bars)	P_f (bars)
1.5	546.6	8.32	0.5
3	1098.92	8.18	0.6
4.5	1117.73	8.44	0.7

➤ **Sondage pressiométrique 2**

Profondeur (m)	E_P (bars)	P_L (bars)	P_f (bars)
1.5	2021.6	31.59	0.25
3	2114.7	35.80	0.39
4.5	2061.5	38.96	0.42

➤ **Sondage pressiométrique 3**

Profondeur (m)	E_P (bars)	P_L (bars)	P_f (bars)
1.5	1529.5	33.57	0.28
3	2308.5	33.72	0.35
4.5	2115.3	33.88	0.45

➤ **Sondage pressiométrique 1**

Les figures ci-dessous présentent les profils pressiométriques du sondage 1.

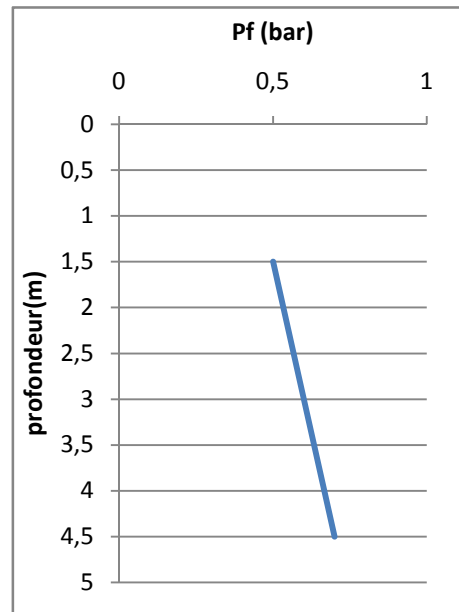
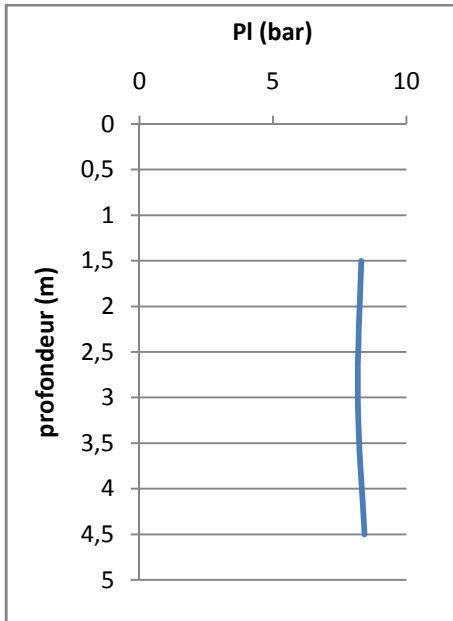


Figure III.12 : Profil des pressions limite.

Figure III.13 : Profil des pressions de fluage.

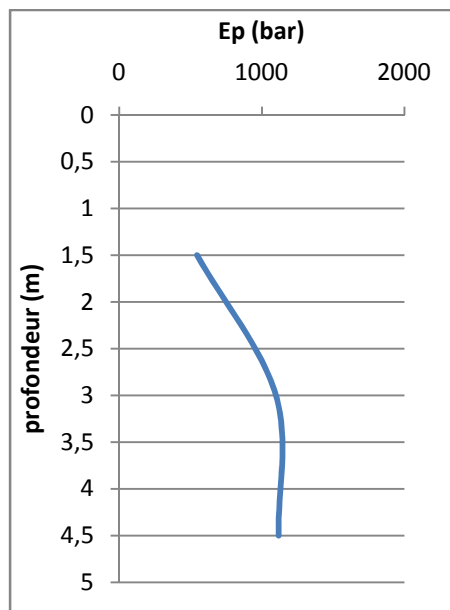


Figure III.14 : Profil des modules pressiométriques

➤ **Sondage pressiométrique 2**

Les figures ci-dessous présentent les profils pressiométriques du sondage 2.

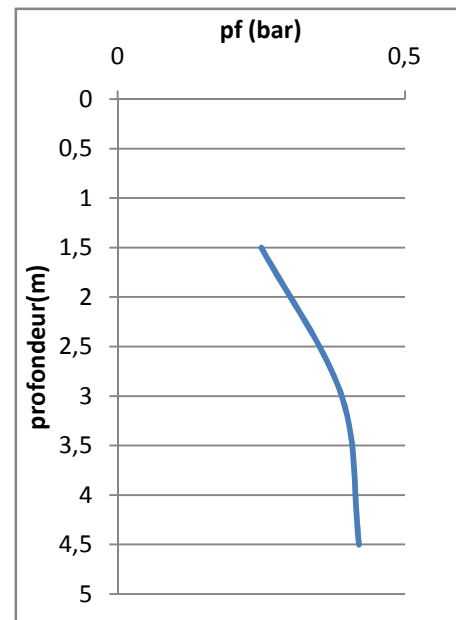
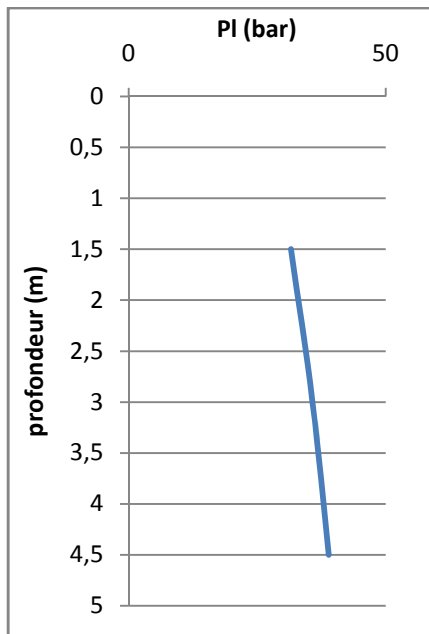


Figure III.15 : Profil des pressions limite

Figure III.16 : Profil des pressions de fluage.

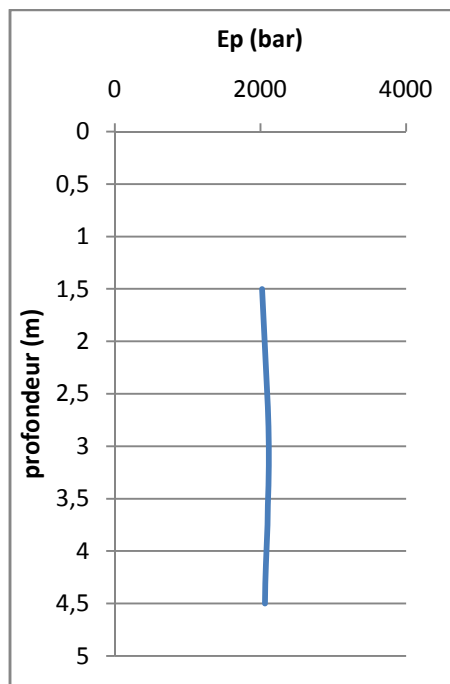


Figure III.17 : Profil des modules pressiométriques.

➤ **Sondage pressiométrique 3**

Les figures ci-dessous présentent les profils pressiométriques du sondage 3.

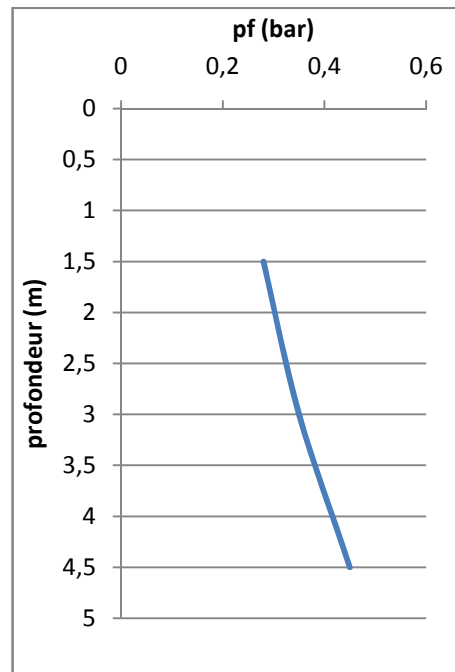
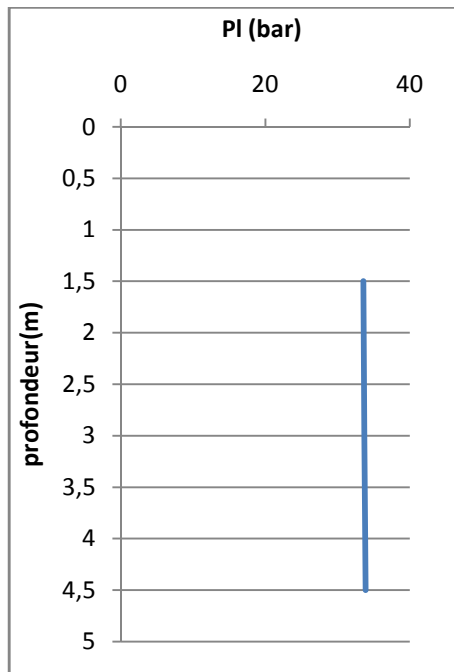


Figure III.18 : Profil des pressions limites Figure III.19 : Profil des pressions de fluage.

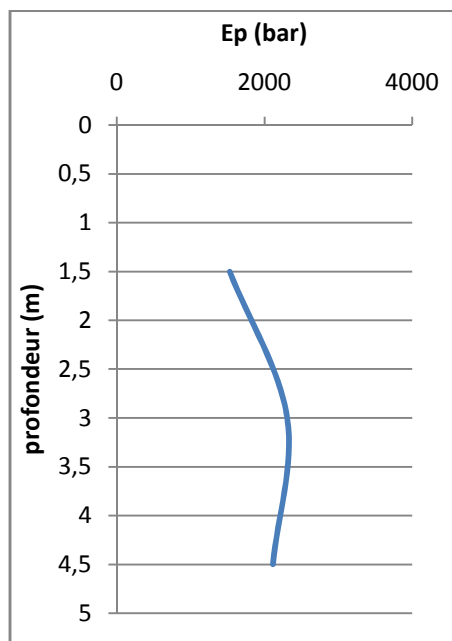


Figure III.20 : Profil des modules pressiométriques.

Les résultats de calcul de E_p et P_l , P_f sont tracés en fonction de la profondeur, (les figures ; III.12 jusqu'à III.20) illustrent la variation de ces trois paramètres en fonction de la profondeur.

On remarque de ces profils que les variations des pressions limites et des modules pressiométriques en fonction de la profondeur sont très faibles ce qui signifie une présence des couches de sol qui ont la même composition ce qui permet de dire qu'on est en face d'un sol homogène, de plus les valeurs de P_l sont très importantes, c'est un sol rocheux.

III.2 Détermination de la cohésion non drainée

Après avoir réalisé l'essai pressiométrique et calculer les paramètres E_p , P_l et P_f pour les trois sondages pressiométriques pour chaque profondeur, on passe à l'exploitation de ces résultats, ces derniers permettent de déterminer la cohésion non drainée avec les différentes méthodes d'interprétation de l'essai pressiométrique présentées dans le chapitre(II).

On commence par déterminer C_u avec les méthodes de Menard, Amar et Jezequel ensuite avec la méthode de Gibson et Anderson et on termine avec la méthode de Baguelin et Al.

Afin de déterminer la cohésion non drainée avec la méthode de Baguelin et Al on procède à l'ajustement de la courbe théorique sur la courbe expérimentale, ensuite on dérive la courbe pressiométrique pour obtenir la courbe de cisaillement, et ça pour chaque profondeur ce qui amène à identifier les différentes cohésions (C_u), un exemple de dérivation de la courbe pressiométrique est montré par la figure(III.21)

Les différentes cohésions non drainée déterminé sont présentées en fonction de la profondeur dans le tableau(III.4), ainsi que la courbe correspondante montrée par la courbe (Figure III.22).

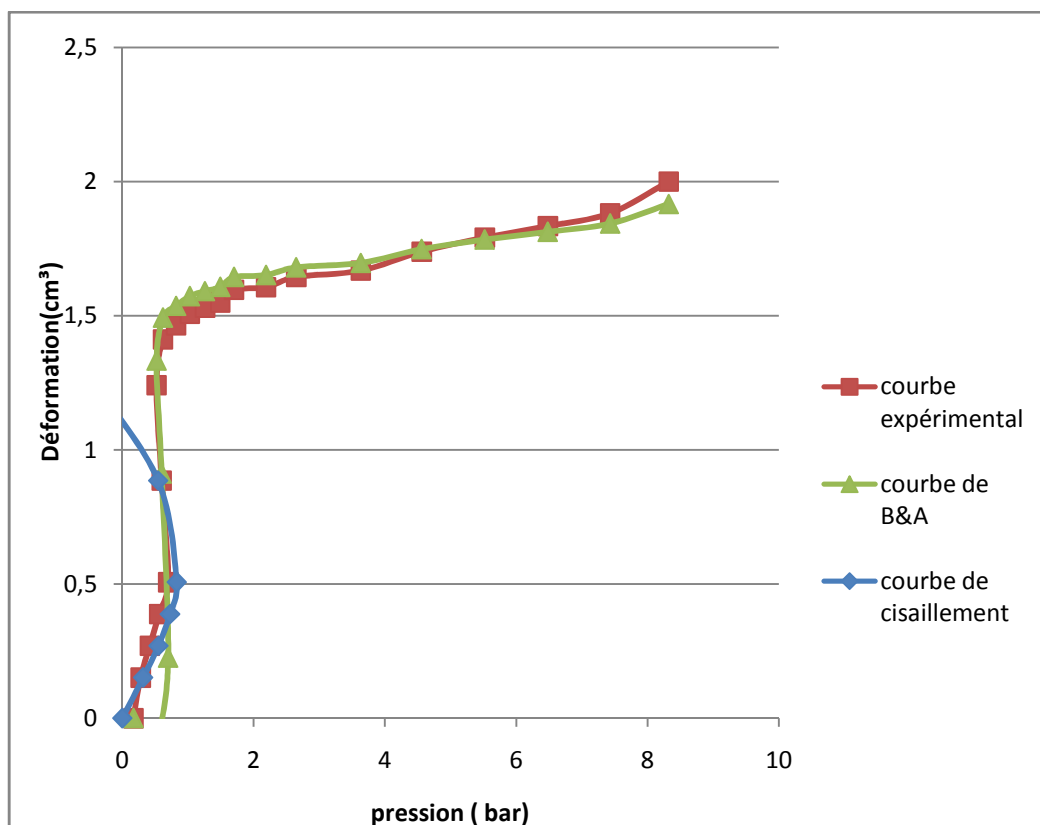


Figure III.21 : Courbe de dérivation de la courbe pressiométrique avec la méthode de la sous tangente.

Tableau III.4 : Valeur des cohésions non drainée.

	Profondeur (m)	C_U Avec la méthode de Menard	C_U Avec la méthode de A&J	C_U Avec la méthode de G&A	C_U Avec la méthode de B&A
Sondage1	1.5	1.48	1.065	1.2	0.72
	3	1.48	1.066	1.15	0.87
	4.5	1.47	1.062	1.10	0.8
Sondage2	1.5	5.73	3.406	5	1.76
	3	6.47	3.812	5.8	1.66
	4.5	7.02	4.113	6.5	1.25
Sondage3	1.5	6.09	3.604	6	2
	3	6.09	3.604	5.3	1.65
	4.5	6.1	3.605	5.5	1.5

Les figures ci-dessous présentent les valeurs de la cohésion non drainée déterminées par les quatre méthodes en fonction de la profondeur.

➤ Sondage pressiométrique 1

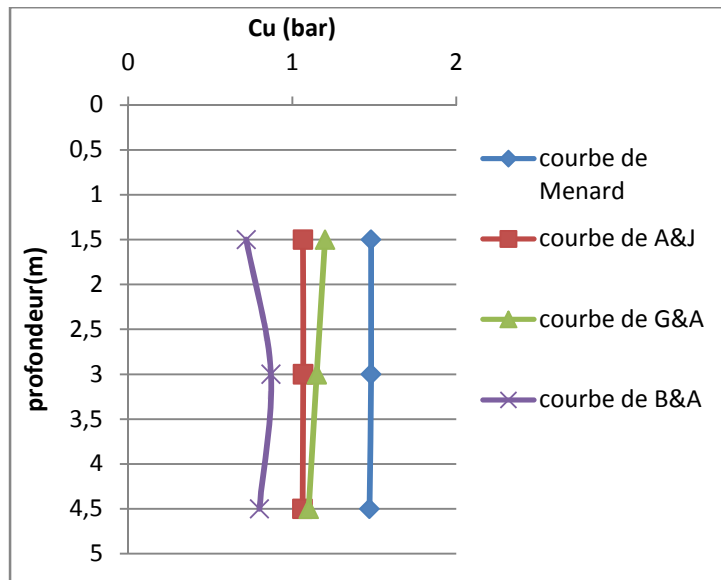


Figure III.22 : Profils des cohésions non drainées.

➤ Sondage pressiométrique 2

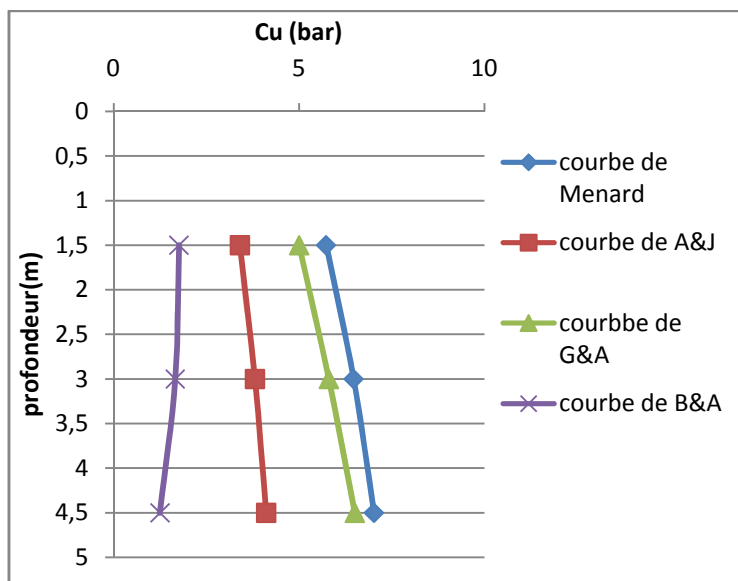


Figure III.23 : Profils des cohésions non drainées.

➤ Sondage pressiométrique 3

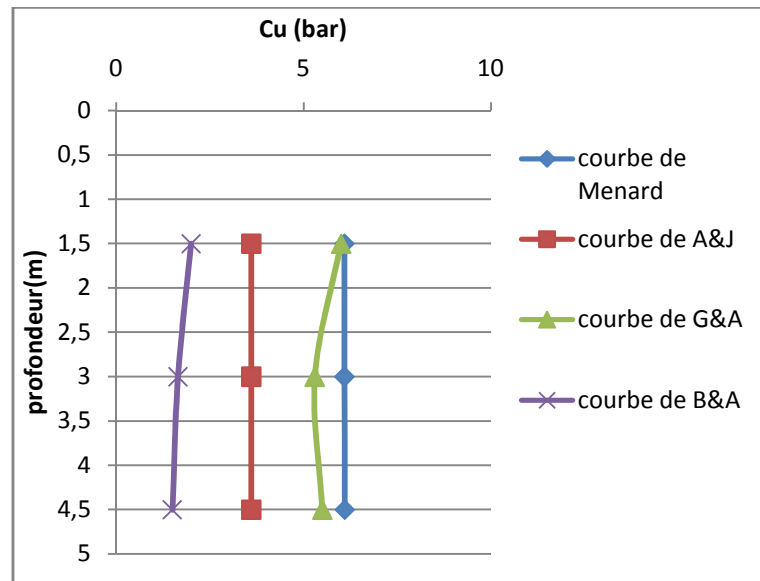


Figure III.24 : Profils des cohésions non drainées.

Conclusion

Dans ce chapitre on a tracé la courbe pressiométrique brute obtenues à travers les lectures directs des pressions et des volumes, après on a effectué la correction de ces courbes brutes qui ne peuvent pas être interpréter sans diverses corrections.

Ensuite, on a calculé le module pressiométrique E , et la pression limite P_L , à partir des courbes corrigées, ces derniers sont représentés sur des profils pressiométriques en fonction de la profondeur.

L'exploitation de ces résultats a permet de déterminer la cohésion non drainée en utilisant quelques méthodes d'interprétation de l'essai pressiométrique, à citer la méthode de Menard, la méthode de Amar et Jezequel, la méthode de Baguelin et Al et celle de Gibson et Anderson.

Le chapitre suivant sera consacré à la présentation du code de calcul par éléments finis PLAXIS 2D et à la modélisation de l'essai pressiométrique.

Chapitre IV
Modélisation de l'essai pressiométrique

Introduction :

Après avoir présenté l'essai pressiométrique et tracer les courbes pressiométriques corrigées, on a calculé à partir de ces courbes les différents paramètres affectant l'essai pressiométrique, tel que les dimensions du maillage, l'élanement de la sonde ainsi que le coupage sol- fluide.

Pour une meilleure identification de ce sol on va faire une modélisation numérique à l'aide de logiciel PLAXIS 2D qui est basé sur la méthode des éléments finis, en utilisant les différentes valeurs de cohésions trouvées dans le chapitre précédent.

IV.1 Présentation du logiciel PLAXIS

Le logiciel PLAXIS est un logiciel basé sur la méthode des éléments finis de référence en géotechnique, dont le développement commença en 1987 à l'initiative du ministère des travaux publics et d'hydrologie des Pays-Bas.

Son but initial était de créer un code éléments finis facilement utilisable en 2D pour analyser l'effet de l'implantation d'une digue fluviale sur les argiles molles des Pays-Bas. En quelques années, PLAXIS a été étendu à plein d'autre domaine de la géotechnique. En 1998, la première version de PLAXIS pour Windows est développée. Durant la même période une version 3D du logiciel a été développée. Après quelques années de développement le logiciel 3D PLAXIS Tunnel program est sorti en 2001.

PLAXIS 2D est donc un programme en deux dimensions spécialement conçu pour réaliser des analyses de déformation et de stabilité pour différents types d'applications géotechniques. Les situations réelles peuvent être représentées par un modèle plan (déformation plane) ou axisymétrique. L'algorithme général du code PLAXIS consiste à résoudre un système d'équations algébriques non linéaires selon un processus itératif pour déterminer les valeurs de déplacements aux différents nœuds du maillage, le champ de contraintes et les états de rupture du sol.

Le programme utilise une interface graphique pratique permettant aux utilisateurs de générer rapidement un modèle géométrique et un maillage d'éléments finis basés sur la coupe verticale de l'ouvrage à étudier. Il permet d'analyser plusieurs problèmes de géotechniques, comme les calculs de fondations, stabilité des pontes, calculs des tunnels.

IV.2 Simulation numérique de l'essai pressiométrique

La modélisation de l'essai pressiométrique est très simple vu la simplicité des conditions aux limites qui le régissent.

La modélisation de l'essai pressiométrique se fait en axisymétrie (autour de l'axe vertical), le volume du sol est modélisé avec des éléments de 15 nœuds.

Le choix des dimensions de la grille est basé sur des études antérieures où il a été trouvé qu'à partir de ces valeurs, aucune variation n'est observées (Bahar, 1992, Zanier 1985)

On procède à la modélisation de chaque essai selon la géométrie donnée par la figure (IV.1) et avec les paramètres déterminés dans le chapitre (3) donnés dans le tableau (IV.1) et (IV.2). Le modèle de comportement utilisé pour la modélisation de ces essais est le modèle de Mohr-Coulomb.

Pour la longueur de l'échantillon, on a pris la même longueur prise par [Bahar, 1992], qui est égale à 4 m, puisque il a montré qu'elle est suffisante pour éliminer l'influence du massif.

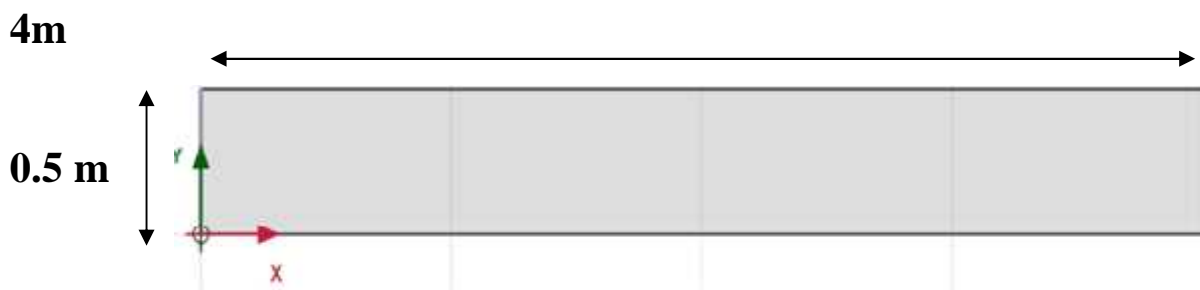


Figure IV.1 : Dimension de la grille à modéliser.

Tableau IV.1 : Paramètres du sol pour chaque profondeur➤ **Sondage Pressiométrique 1**

Profondeur	γ_u (kn /m ²)	s (kn /m ²)	E (bars)
1.5	19.9	24	546.6
3	19.9	24	1098.92
4.5	19.9	24	1117.73

➤ **Sondage Pressiométrique 2**

Profondeur	γ_u (kn /m ²)	s (kn /m ²)	E (bars)
1.5	19.9	24	2021.6
3	19.9	24	2114.7
4.5	19.9	24	2061.5

➤ **Sondage Pressiométrique 3**

Profondeur	γ_u (kn /m ²)	s (kn /m ²)	E (bars)
1.5	19.9	24	1529.5
3	19.9	24	2308.5
4.5	19.9	24	2115.3

Pour la simulation de ces essais on a utilisé les cohésions déterminées par les méthodes d'interprétation de l'essai pressiométrique montrées dans le tableau (IV.2).

Tableau IV.2 : Cohésion non drainée déterminé dans le chapitre (3).

	Profondeur(m)	C_U Avec la méthode de L.Menard (bar)	C_U Avec la méthode de A&J (bar)	C_U Avec la méthode de B&A (bar)
Sondage 1	1.5	1.48	1.065	0.72
	3	1.48	1.066	0.87
	4.5	1.47	1.062	0.8
Sondage 2	1.5	5.73	3.406	1.76
	3	6.47	3.812	1.66
	4.5	7.02	4.113	1.25
Sondage 3	1.5	6.09	3.604	2
	3	6.09	3.604	1.65
	4.5	6.01	3.605	1.5

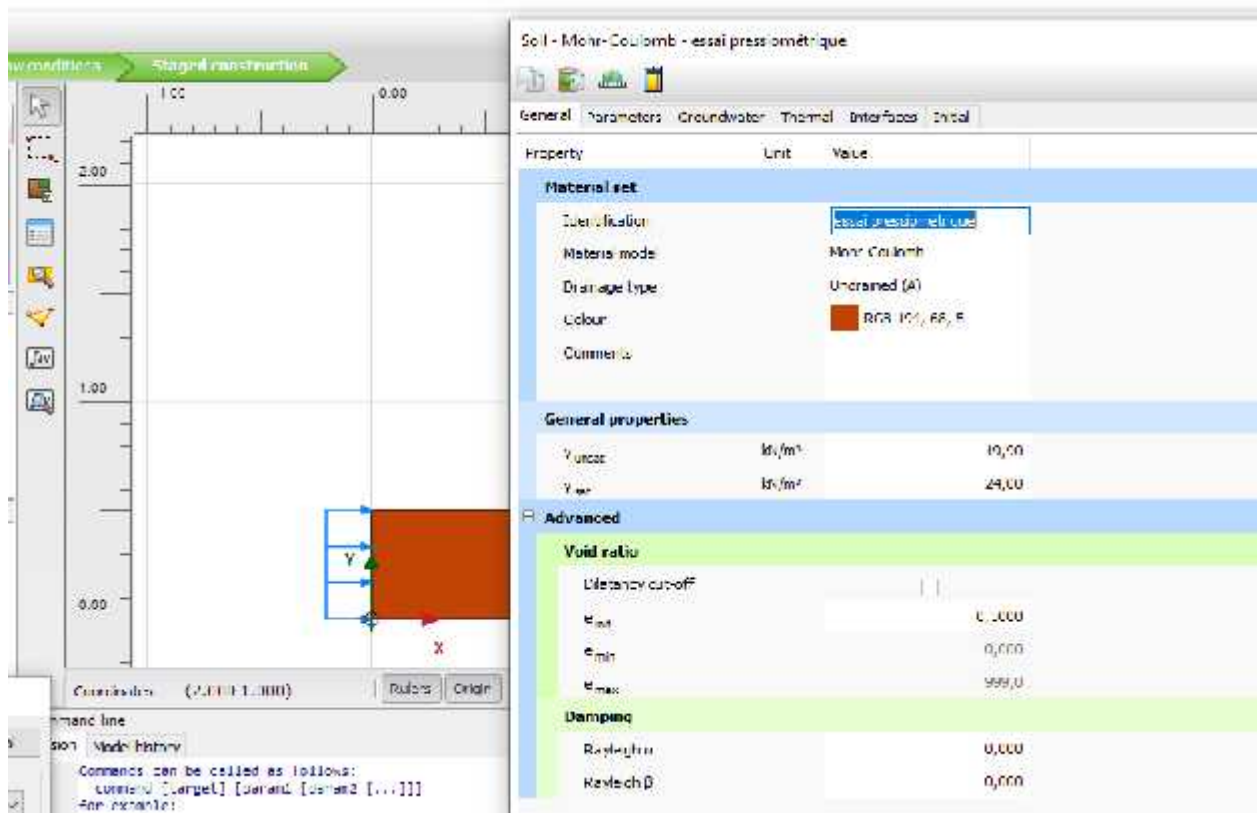


Figure IV.2 : Fenêtre d'introduction des paramètres du sol

IV.2.1 Conditions aux limites

Afin de simuler numériquement l'essai pressiométrique, nous avons imposé les conditions aux limites de la figure (IV.3). Le sol est libre sur les parois verticales du forage où le chargement sera appliqué par la sonde pressiométrique.

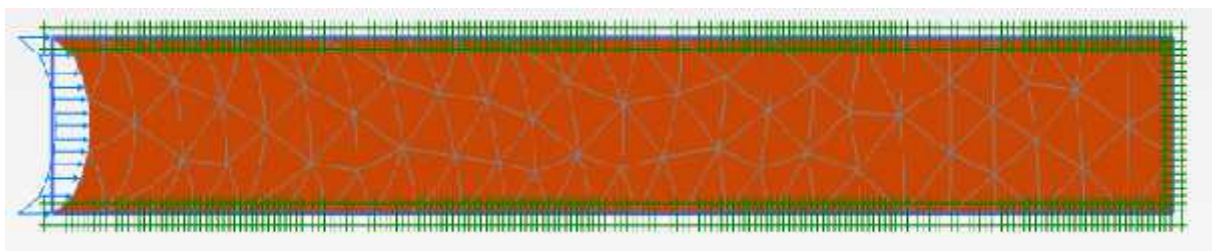


Figure IV.3 : Maillage et conditions aux limites

IV.2.2 Conditions initiales

Pour tous les essais, les différentes couches des sols considérées sont affectées des conditions initiales suivantes :

$$\sigma_{yy} = \gamma \quad [\text{IV.1}]$$

$$\sigma_{xx} = K_0 \sigma_y \quad [\text{IV.1}]$$

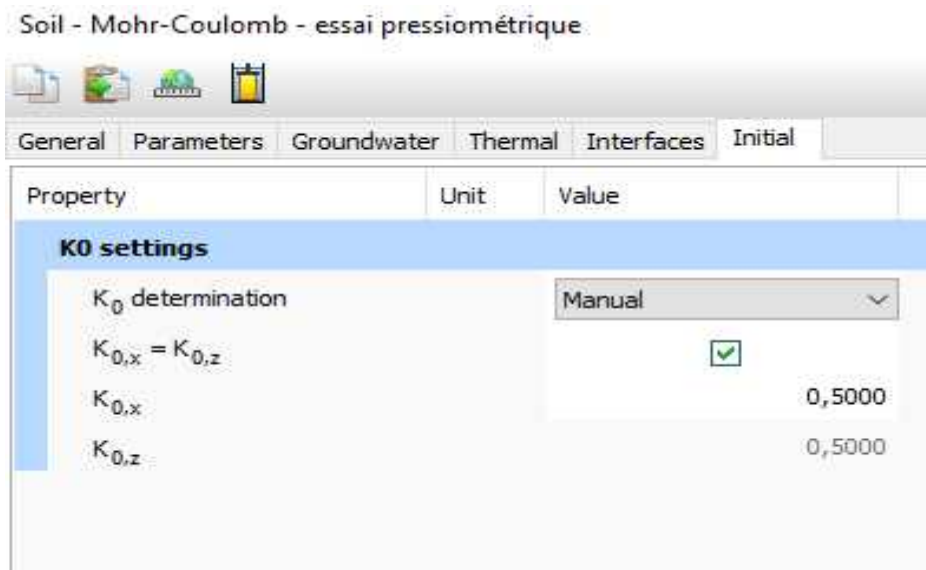


Figure IV.4 : Paramètre de condition initiale k_0

IV.2.3 Procédures de simulation numérique

L'expansion de la sonde pressiométrique est alors simulée en augmentant la charge uniforme. Pour chaque étape de calcul, on obtient les déplacements et les contraintes en tout point du massif. Pour obtenir la variation de volume globale de la sonde. Ce chargement est appliqué radialement sur une longueur égale à la longueur de la sonde, en fond de forage, en augmentant les pressions de $P_0 = 800k / m^2$ jusqu'à atteindre une pression limite.

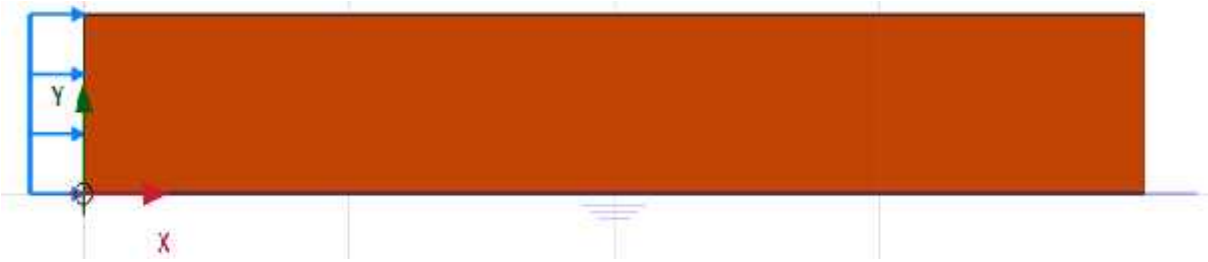


Figure IV.5 : Chargement appliqué

IV.3 Résultats et interprétations

La simulation de l'essai pressiométrique pour différentes profondeurs a été effectuée, en considérant les valeurs de cohésion des trois méthodes (Menard, Amar et Jezequel, et Baguelin).

Les différents résultats des modélisations de l'essai pressiométrique sont illustrés par les figures (IV.6) ; 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14.

➤ Sondage pressiométrique 1

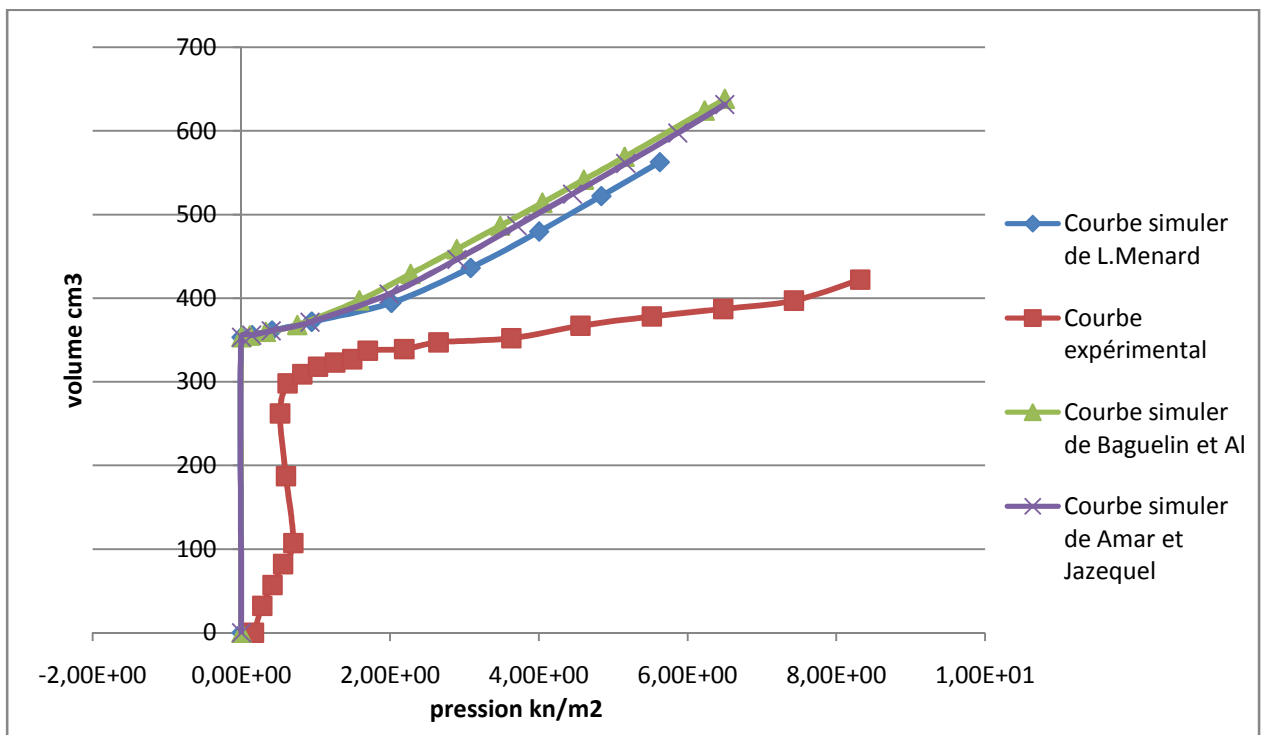


Figure IV.6 : Les courbes résultant de la simulation de l'essai pressiométrique à 1.5m.

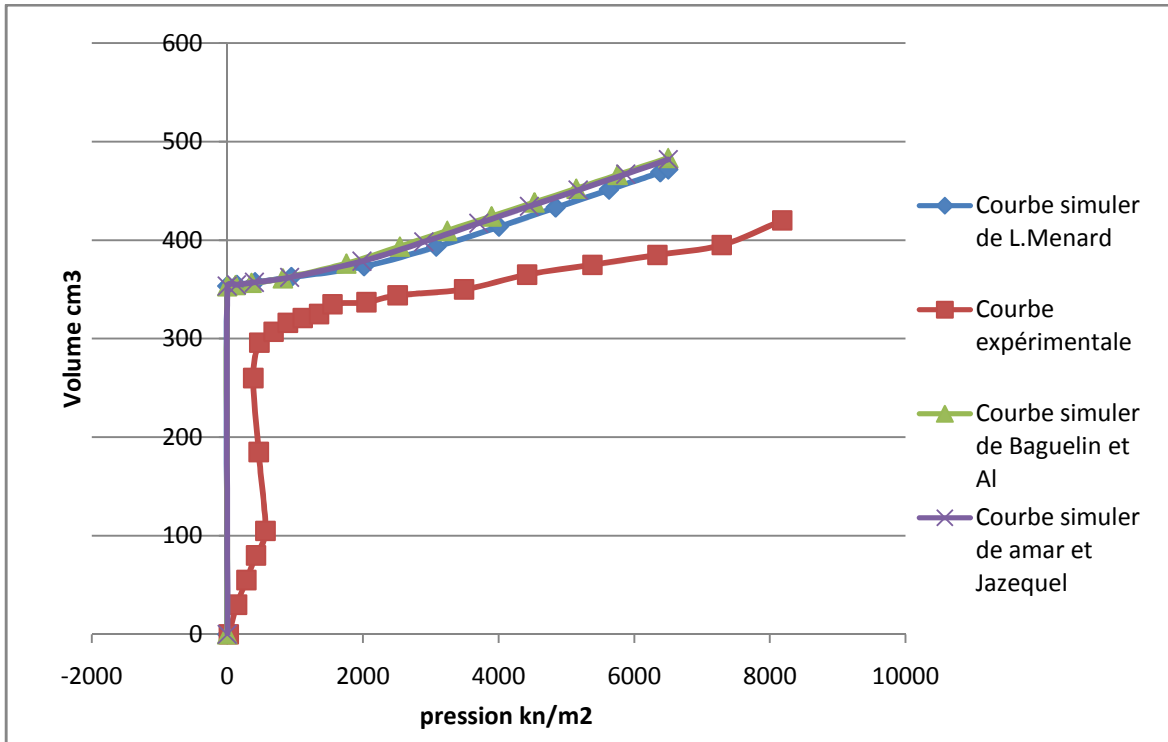


Figure IV.7 : Les courbes résultant de la simulation de l'essai pressiométrique à 3m.

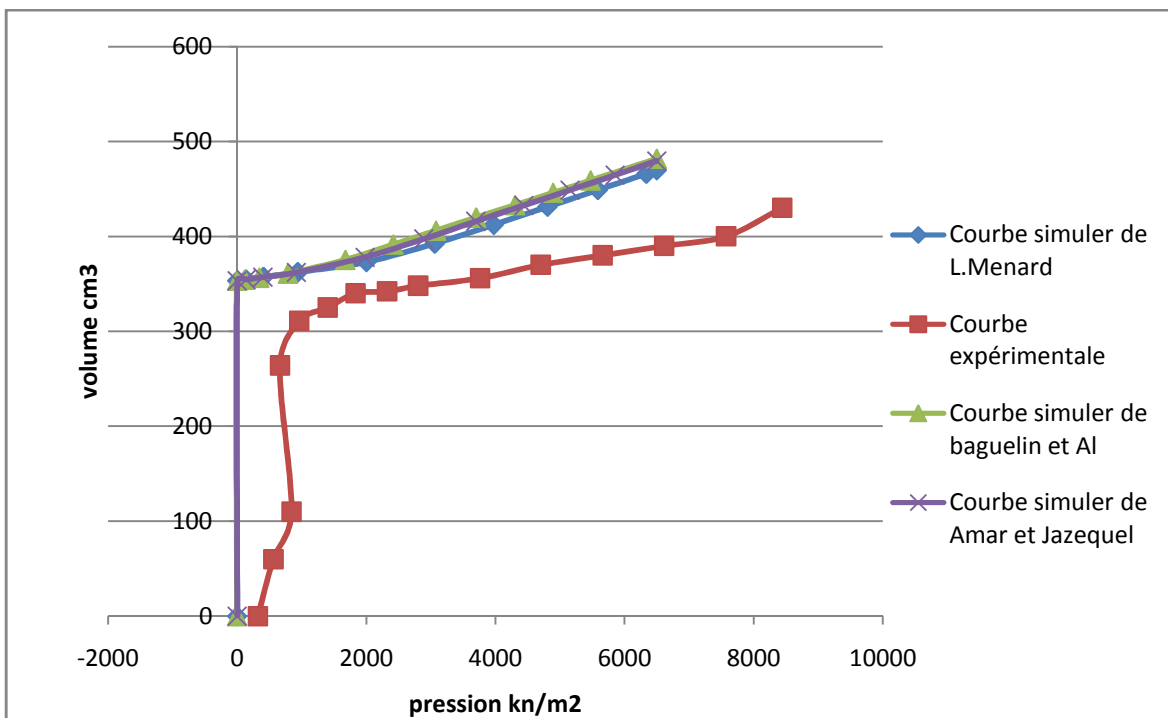


Figure IV.8 : Les courbes résultant de la simulation de l'essai pressiométrique à 4.5m.

➤ Sondage pressiométrique 2

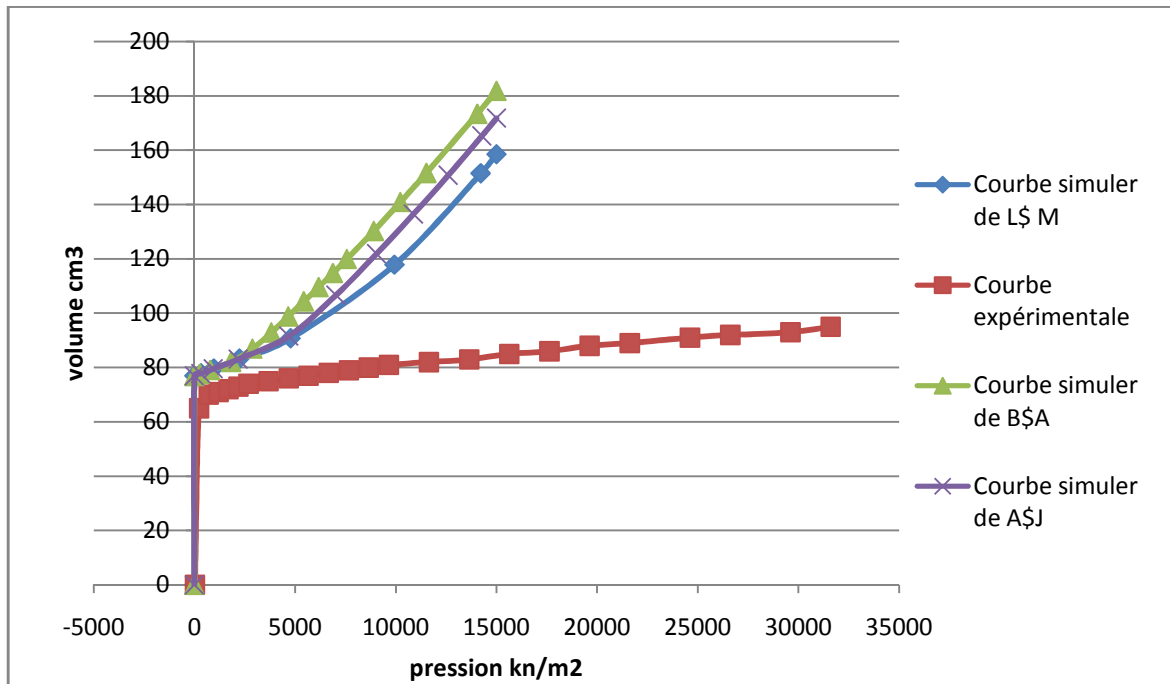


Figure IV.9 : Les courbes résultant de la simulation de l'essai pressiométrique à 1.5m.

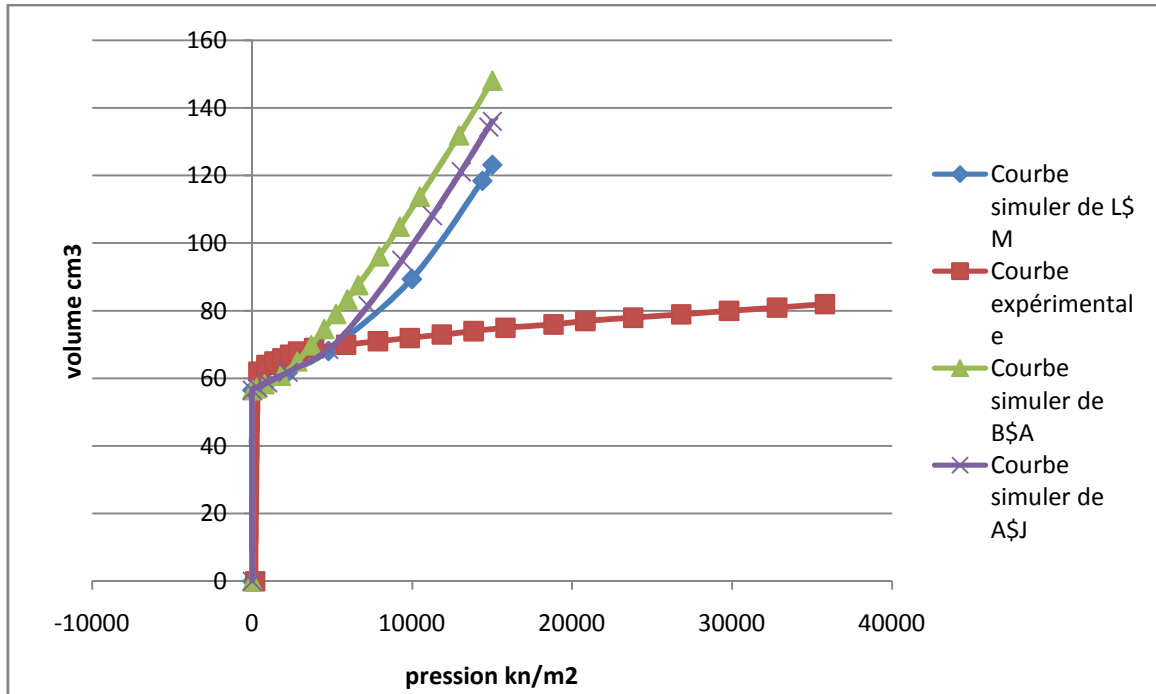


Figure IV.10: Les courbes résultant de la simulation de l'essai pressiométrique à 3m.

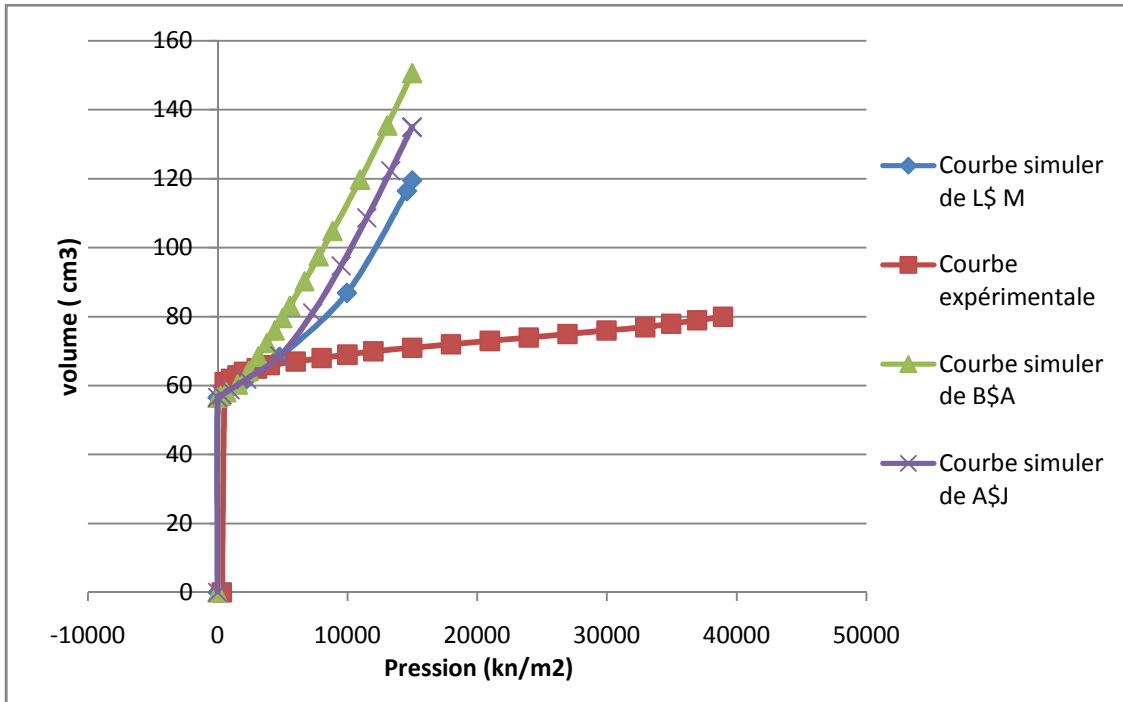


Figure IV.11 : Les courbes résultant de la simulation de l'essai pressiométrique à 4.5m.

➤ **Sondage pressiométrique 3**

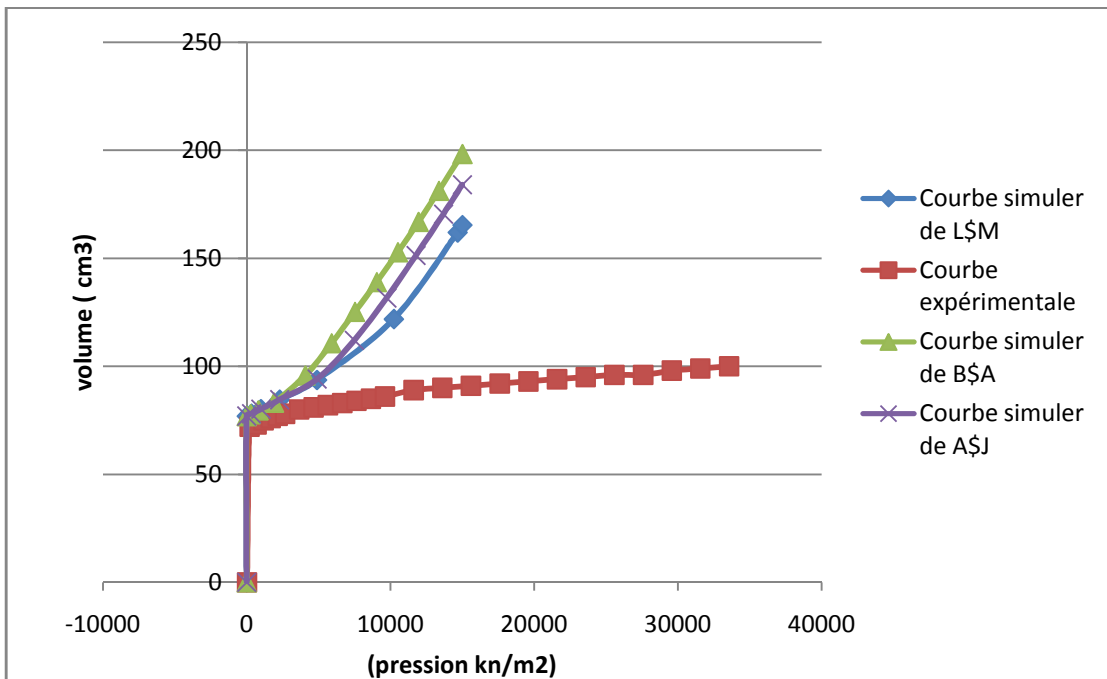


Figure IV.12 : Les courbes résultant de la simulation de l'essai pressiométrique à 1.5m.

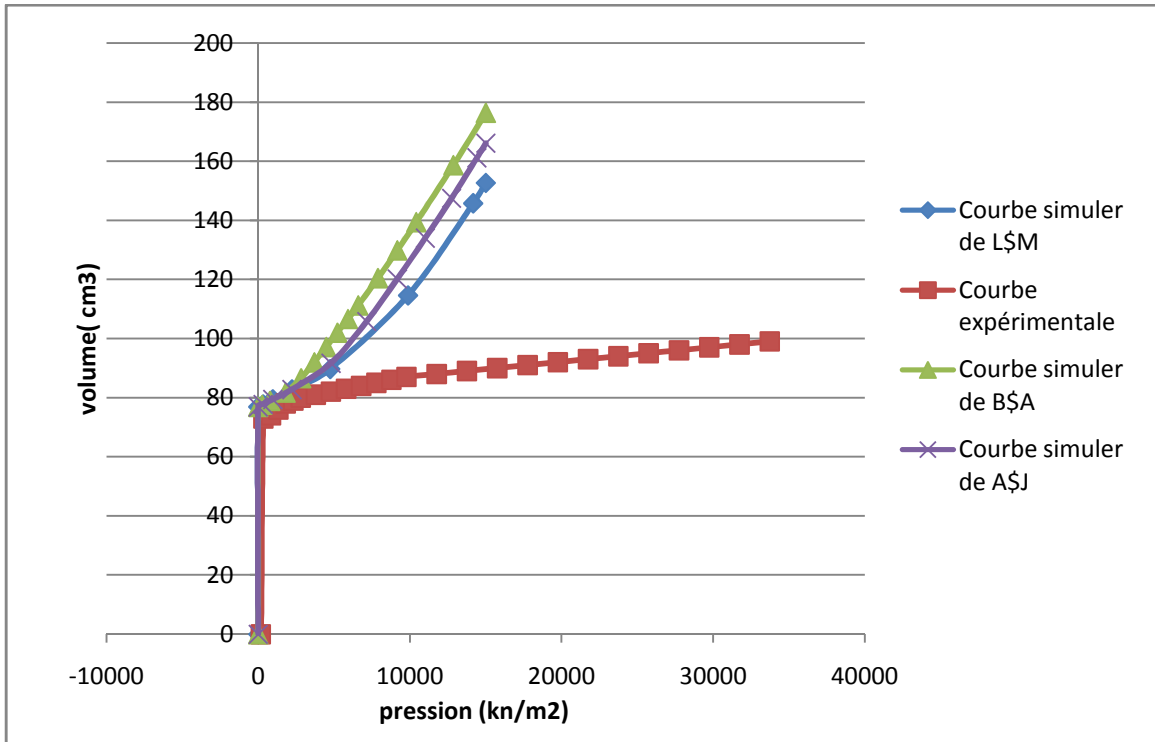


Figure IV.13 : Les courbes résultant de la simulation de l'essai pressiométrique à 3m.

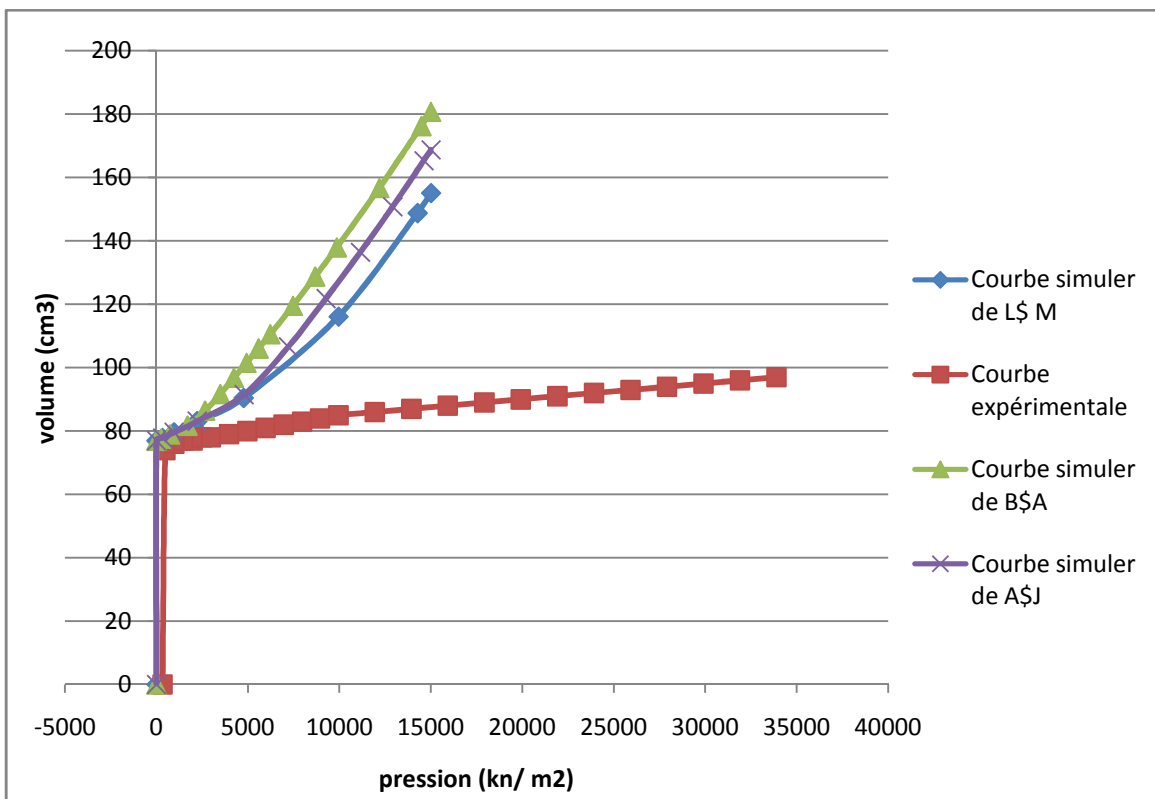


Figure IV.14 : Les courbes résultant de la simulation de l'essai pressiométrique à 4,5m.

De ces différentes figures on constate que :

- La courbe pressiométrique varie avec la variation de la cohésion, où on remarque que plus C_u augmente plus Pl augmente.
- On peut déduire quels sont les paramètres de comportement identifiables à partir des simulations de l'essai pressiométrique.
- Les différentes valeurs des différentes méthodes ont donné des courbes qui ont l'allure d'une courbe pressiométrique même si ces courbes ne collent pas les courbes pressiométriques expérimentales. Cela est dû à plusieurs raisons ;
 -) Les valeurs d'entrées (c_u) sont des valeurs déterminées de formules empiriques ou théoriques.
 -) Le modèle utilisé est un modèle simple de M.C destiné aux sols pulvérulents, alors que notre sol est rocheux.
 -) Enfin, d'autres méthodes numériques pour l'exploitation de l'essai pressiométrique en vue d'identification existe des paramètres de comportement des sols, en utilisant la méthode inverse, mais cette dernière nécessite l'introduction d'algorithmes d'optimisation.

Conclusion

Dans ce chapitre on a procédé à une simulation d'un essai pressiométrique en

Utilisant l'outil numérique PLAXIS 2D, en considérons un modèle

Élastoplastique de Mohr Coulomb et en utilisant les modules pressiométrique

Epdéterminés dans le chapitre (3), et les cohésions non drainée déterminées

Par différentes méthode(Menard, Amar et Jezequel et La méthode de Baguelin et Al.

D'après les courbes Les différentes valeurs des différentes méthodes ont donné des courbes qui ont l'allure d'une courbe pressiométrique même si ces courbes ne collent pas les courbes pressiométriques expérimentales. Cela est dû à plusieurs raisons, Les valeurs d'entrés (c_{ul}) sont des valeurs déterminées de formules empiriques ou théoriques, et le modèle utilisé est un modèle simple de M.C destiné aux sols pulvérulents, alors que notre sol est rocheux, aussi on constate que la cohésion a une influence sur la courbepressiométrique.

On conclut que les résultats obtenus par simulation numérique ont donné des courbes de chargement en fonction des contraintes, qui sont comparé aux courbes expérimentales.

Conclusion générale

Conclusion générale

L'objectif de ce travail est de faire une modélisation d'un essai pressiométrique, qui est un essai in situ très important pour la détermination des paramètres des sols proche de la réalité, l'importance de cette étape d'identification des paramètres dans le domaine du génie civil nous a mené à exploiter cet essai pour avoir le maximum des paramètres du sol étudié.

En première étape, on a présenté l'essai pressiométrique ainsi que les différents types d'essais pressiométriques existant, ensuite on a présenté les différentes approches utilisées pour l'interprétation de cet essai.

Dans une seconde étape, on a tracé les courbes expérimentales de l'essai pressiométrique, réalisé sur un sol dans la wilaya de Ghardaïa, ensuite on a procédé à la correction de ces courbes car elles sont brutes et ne peuvent pas être interprétées sans ces corrections. Une fois les courbes corrigées sont tracées, on a pu calculer les paramètres pressiométriques, à savoir ; le module pressiométrique E_p qui définit le comportement pseudo-élastique du sol, la pression limite PI qui caractérise la résistance de rupture du sol, et la pression de fluage P_f qui définit la limite entre le comportement pseudo-élastique et l'état plastique, ces paramètres sont utilisés principalement pour le dimensionnement des fondations ainsi que le calcul des tassements.

Dans une troisième étape, on a procédé à la détermination de la cohésion non drainée en utilisant les paramètres pressiométriques déterminés, en utilisant deux méthodes empiriques, qui sont de la méthode de Menard et la méthode de Amar et Jezequel, et une méthode analytique, celle de Baguelin et Al ; et les méthodes numériques. Avec ces dernières on a fait une simulation de cet essai avec le logiciel PLAXIS 2D à l'aide du modèle de Mohr Coulomb.

On constate que les résultats de la modélisation de l'essai pressiométrique présentés par les courbes simulées, Les différentes valeurs des différentes méthodes ont donné des courbes qui ont l'allure d'une courbe pressiométrique même si ces courbes ne collent pas les courbes pressiométriques expérimentales. Cela est dû à plusieurs raisons ; Les valeurs d'entrées (c_{uk}) sont des valeurs déterminées de formules empiriques ou théoriques, et le modèle utilisé est un modèle simple de M.C destiné aux sols pulvérulents, alors que notre est rocheux.

L'exécution des différents essais, nous a permis au mieux de comprendre l'essai pressiométrique sur le plan pratique et théorique et ainsi d'être capable d'exploiter les résultats expérimentaux afin d'élaborer une interprétation, ce qui nous donnera la capacité de calculer les différents ouvrages de génie civil en se basant sur cet essai.

En fin, d'autres méthodes numériques pour l'exploitation de l'essai pressiométrique en vue d'identification existante des paramètres de comportement des sols, en utilisant la méthode inverse, mais cette dernière Nécessite l'introduction d'algorithmes d'optimisation.

Références bibliographiques

-] **Baguelin F, Jezequel J. F, (1973).** Le pressiomètre autoforeur ”, Annales de L’ITBTP, n°308, pp. 133-160
-] **Jezequel J., Lamée E., Saintilan D. (1974),** Exploitation de l’essai pressiométrique normal par méthode numérique, Bull. Liaison Labo. P. et Ch., 69, Réf. 1375, PP.105-114.
-] **Ménard, L. (1957).** Mesure in-situ des propriétés physiques des sols. Annales des Ponts et Chaussées, Paris, mi-juin 1957, p. 356-377.
-] **HICHER P.Y., SHAO J.F., 2002,** Méthodes d’identification des paramètres, dans modèles de comportement des sols et des roches 2 : lois incrémentales, viscoplasticité, endommagement, Ed. Hermès, p. 203-230.
-] **Bahar R. 1992.** Analyse numérique de l’essai pressiométrique : application à l’identification de paramètres de comportement des sols, Thèse de doctorat, Ecole Centrale de Lyon.
-] **AFNOR2000** norme française NF P- 94-110, Essai pressiométrique Menard, partie1 sans cycle. AFNOR, La Plaine Saint-Denis, France.
-] **GUETTAFI Nesrine (2012)** « Comportement des sols mous lors d’un essai pressiométrique», Mémoire de magistère. Thèse présentée à l’université El Hadj Lakhdar, Batna.
-] **Maurice CASSAN (1978)** « Les essais in Situ En Mécanique Des Sols, réalisation et interprétation ». Tome I. Editions EYROLLES.PARIS.
-] **Maurice CASSAN (1978)** « Les essais in Situ En Mécanique Des Sols, Application aux méthodes de calcul ». Tome II. Editions EYROLLES.PARIS.
-] **BELAHASSANI Ourda (2007)** «Modélisation de l’essai pressiométrique cyclique», Thèse de magistère. université des sciences et technologies Houari BOUMEDIENNE de BABA EZZOUAR.
-] **ALIOUA Sonia (2013)** « Etude numérique du comportement des sols de la zone portuaire de Bejaia soumis à la sollicitation sismique (FLAC2D) » Mémoire de fin d’étude. présentée à l’université Mouloud MAMMERY Tizi Ouzou.
-] **MEGHLAT El-Mahdi (2006)** «Etude numérique du comportement des matériaux granulaire (Pegmatite Et Calcaire), Application Du Critère Druker Prager, Mohr- Coulomb et du modèle Strain

Softening/Hadening», Thèse de magistère, présentée à l'université Mouloud MAMMERI Tizi Ouzou.

-) **MELBOUCI Bachir (2009)** « Méthode de calcul de stabilité des fondations, des talus et des ouvrages de soutènement ». Editions Elamel.ALGERIE.
-) **Mohammad AL HUSEIN (2001)** « Étude du comportement différé des sols et ouvrages géotechniques ». Thèse présentée à l'université Joseph FOURIER – Grenoble I.
-) **Youssef BENTAIEBI (2011)** « Analyse théorique et numérique du comportement) non drainé d'une argile sur consolidée lors d'un essai pressiométrique». Thèse présentée à l'école polytechnique de Montréal.
-) **Ménard L. (1967 & 1975)**, Règles d'utilisation des techniques pressiométriques et d'exploitation des résultats obtenus pour le calcul des fondations. Notice générale D60.
-) **Soegiri, S. (1991)**. Modélisation de l'essai pressiométrique avec prise en compte de l'interaction fluide solide. Thèse de doctorat, École centrale de Lyon, Lyon, France.
-) **MONNET T.-J., KHLIF J. (1994)**, Étude théorique de l'équilibre élastoplastique d'un sol pulvérulent autour du pressiomètre, Revue française de géotechnique, 67, pp. 3-12.
-) **ALIMRINA Nassima (2009)** « Analyse des méthodes d'identification des paramètres de comportement des sols à partir d'essais in situ », mémoire de magistère. présentée à l'université Mouloud MAMMERI Tizi Ouzou.
-) **AFETTOUCHE Mokrane et LARFi Aomar (1996)** « Détermination des paramètres de comportement des sols a partir de l'essai pressiométrique» Mémoire de fin d'étude. présentée à l'université Mouloud MAMMERI Tizi Ouzou.